

GRUPO INNOVACIONES MARIÑAS
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES NAVAIS



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA
EXPERIMENTAL DE
PROPULSIÓN ONDULANTE Y
DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN
DE SU COMPORTAMIENTO
MEDIANTE CFD**

JUAN DE DIOS RODRIGUEZ GARCIA

FERROL, OCTUBRE DE 2.010

GRUPO INNOVACIONES MARIÑAS
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES NAVAIS



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE UN SISTEMA
EXPERIMENTAL DE
PROPULSIÓN ONDULANTE Y
DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN
DE SU COMPORTAMIENTO
MEDIANTE CFD**

AUTOR: JUAN DE DIOS RODRIGUEZ GARCIA

DIRECTORES DE TESIS:

PRIMITIVO B. GONZALEZ LOPEZ

JOSE LUIS CALVO ROLLE

FERROL, OCTUBRE DE 2.010

AGRADECIMIENTOS

- A la Dirección Xeral de I+D+I de la Xunta de Galicia, por su contribución decisiva para el desarrollo de los trabajos recogidos en el presente documento
 - PROXECTO: DISEÑO DE SISTEMA DE PROPULSIÓN ONDULANTE
 - CÓDIGO: PGIDIT06DPI172PR8
 - INVEST. PRINCIPAL: PRIMITIVO B. GONZÁLEZ LÓPEZ
 - ENTIDADE FINANCIADORA: XUNTA DE GALICIA – PGIDIT 2.006
 - DURACIÓN: DE 15 / 12 / 06 A 15 / 12 / 09

- A la ETS de Ingenieros Industriales de San Sebastián (Universidad de Navarra), a la que debo mi formación universitaria.
- A los profesores y PAS del Dpto. de Construcciones Navais de la Universidad de A Coruña, por la ayuda y amabilidad que me han brindado en todo momento.
- Al Dr. Primitivo B. González López, director del grupo de investigación Innovacións Mariñas de la Universidade da Coruña, investigador principal e impulsor, entre otras, de la línea de investigación en la cual se encuadra el presente trabajo, por su estímulo y apoyo personal.
- Al Dr. José Luis Calvo Rolle, por sus sabios consejos y por el apoyo prestado durante la realización del presente trabajo.
- A los profesores Enrique García Bustelo, Manuel V. Fernández Quintas, Carlos G. Rodríguez Vidal e Isabel Lamas Galdo, por el inestimable valor de la ayuda que me han brindado

– A mi familia y, en especial, a mi padre

RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es el diseño de un propulsor ondulatorio que sea aplicable a vehículos marinos y sistemas de impulsión de fluidos. Fruto del estudio realizado se propone un diseño innovador de superficie propulsora ondulante, constituida por sólidos rígidos e inspirada en la forma de desplazamiento de los peces denominada anguiliforme, el cual ha sido protegido mediante patente de invención ref.: P200803079.

Para lograr el movimiento de dicha superficie ondulante se propone también un diseño innovador de mecanismo de accionamiento basado en excéntricas (asimismo protegido con patente de invención ref.: P200500384)

Con el objeto de comprobar empíricamente el comportamiento del propulsor ondulatorio propuesto, ha sido construido un prototipo en el taller mecánico de la EUP recogiendo las innovaciones antes mencionadas. Además ha sido diseñado un sistema de adquisición de datos y realizado pruebas de tracción a punto fijo en un tanque de ensayos construido ex profeso en la EUP de la UDC.

Asimismo, ha sido elaborado un modelo CFD simplificado (2D), mediante el código comercial Fluent, capaz de predecir el comportamiento hidrodinámico de esta superficie propulsora, el cual permitirá la evolución y optimización de la misma disminuyendo así considerablemente la inversión y tiempo necesarios para la realización de ensayos con prototipos.

ABSTRACT

The objective of this thesis is the design of an undulating propeller that can be applied to the propulsion of marine vehicles and to the propelling of fluids. As a result of the study, it is proposed an innovative design of an undulating propulsion surface, formed by rigid solids (which has been protected by a patent ref.: P200803079), inspired by the way of fish swimming called anguiliform.

For achieving such rippling motion it has been proposed an innovative design of operating mechanism based on eccentrics (also protected by patent ref.: P200500384)

In order to experimentally test the performance of the proposed undulating propeller, a prototype has been built in the mechanical shop of the EUP including the abovementioned innovations. Furthermore, a data acquisition system was designed and bollard pull trials were developed in the test tank, purpose built in the EUP of the UDC

It has also been developed a 2D simplified CFD model, using the commercial code Fluent, to predict the hydrodynamic behavior of the driving surface, which will allow the development and optimization of the same, significantly reducing economic investment and time needed for tests with prototypes.

RESUMO

O obxectivo da presente tese é o deseño dun propulsor ondulatorio que sexa aplicable a vehículos mariños e sistemas de impulsión de fluidos. Froito do estudo realizado propónse un deseño innovador de superficie propulsora ondulante, constituída por sólidos ríxidos, o cal foi protexido mediante patente de invención ref.: P200803079 e inspirado na forma de desprazamento dos peixes denominada anguiliforme.

Para lograr o movemento da devandita superficie ondulante propónse un deseño innovador de mecanismo de accionamento baseado en excéntricas (tamén protexido con patente de invención ref.: P200500384)

Co obxecto de comprobar empiricamente o comportamento do propulsor ondulatorio proposto, foi construído un prototipo no taller mecánico da EUP recollendo as innovacións antes mencionadas. Ademais foi deseñado un sistema de adquisición de datos e realizadas probas de tracción a punto fixo nun tanque de ensaios construído ao efecto na EUP da UDC.

Así mesmo, foi elaborado un modelo CFD simplificado (2D), mediante o emprego do código comercial Fluent, capaz de predicir o comportamento hidrodinámico desta superficie propulsora, o cal permitirá a evolución e optimización da mesma, diminuindo así considerablemente o investimento e o tempo necesarios para a realización de ensaios con prototipos.

INDICE

INDICE

1. INTRODUCCIÓN**1.1. Clasificación de los diversos modos de locomoción de los peces 2**

1.1.1. Clasificación de los modos de propulsión atendiendo a la temporalidad.... 3

1.1.2. Clasificación atendiendo a la configuración propulsora empleada 3

1.1.2.1. Locomoción BCF 3

1.1.2.2. Locomoción MPF 5

**1.2. Antecedentes y referencias a trabajos de investigación sobre sistemas
de propulsión marina biológicamente inspirados 6**

1.2.1. Universidade da Coruña 6

1.2.2. Otros antecedentes 7

1.2.2.1. El ingeniero naval Juan José Chico y Gárate 7

1.2.2.2. El Massachussets Institute of Technology – MIT (USA)..... 8

1.2.2.3. Nacional Maritime Research Institute de Japón (NMRI)..... 9

1.2.2.4. Beijinj University of Aeronautics & Astronautics (BUAA) 11

1.2.2.5. Universidad de Essex (Reino Unido) 12

1.2.2.6. Universidad de Tartu (Estonia)..... 13

1.2.2.7. Universidad Tecnológica de Nanyang (Singapur) 14

1.2.2.8. Universidad Tecnológica de Cracovia (Polonia)..... 15

1.2.2.9. Universidad de Delft (Holanda) 16

1.2.2.10. Northeastern University of Maryland (USA)..... 17

1.2.2.11. Laboratorio Draper 17

2. OBJETIVOS**2.1. Hipótesis de partida..... 19****2.2. Objetivos de esta tesis..... 23**

3. ENSAYO CFD

3.1. Elaboración de la geometría (dominio computacional).....	25
3.1.1. Forma de onda modelizada a partir de ocho segmentos rígidos	26
3.1.2. Forma de onda modelizada de modo continuo.....	27
3.2. Deformación del mallado gobernada por UDF	29
3.2.1. Modelización del movimiento de la forma de onda constituida por 8 segmentos rígidos articulados entre sí.	29
3.2.2. Modelización del movimiento de la forma de onda conformada de modo continuo	32
3.2.3. Esquema empleado de mallado dinámico	33
3.3. Simulaciones flujo turbulento	34
3.3.1. Modelo Numérico bidimensional.....	34
3.3.1.1. Ecuaciones gobernantes	34
3.3.1.2. Parámetros de cálculo modelo transitorio	37
3.3.1.2.1. Definición de material.....	37
3.3.1.2.2. Definición de condiciones de operación	37
3.3.1.2.3. Definición de condiciones de contorno.....	37
3.3.1.2.4. Definición de movimiento de malla	38
3.3.1.2.5. Habilidad de modo de cálculo.....	38
3.3.1.2.6. Definición de modelo de turbulencia	39
3.3.1.2.7. Definición de parámetros de resolución de las ecuaciones de gobierno	39
3.3.1.2.8. Definición de Time Step e inicio del cálculo	39
3.3.2. Postproceso.....	40
3.3.2.1. Ecuaciones de cálculo de fuerzas hidrodinámicas	40
3.3.2.2. Simulaciones equivalentes a ensayos de tracción	

a punto fijo “modelo sin velocidad de entrada de flujo impuesta por <i>izquierda</i> ”	40
3.3.2.2.1. Boundary conditions.....	41
3.3.2.2.2. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en las simulaciones	41
3.3.2.2.3. Campo de velocidades	44
3.3.2.2.4. Campo de presiones.....	46
3.3.2.3. Simulaciones equivalentes a ensayos de propulsor aislado “modelo con velocidad de entrada en izquierda”	47
3.3.2.3.1. Boundary conditions.....	47
3.3.2.3.2. Estudio adimensional realizado.....	48
3.3.2.3.3. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en las simulaciones	49
3.3.2.3.4. Campo de velocidades	50
3.3.2.3.5. Campo de presiones.....	52
3.4. Simulaciones régimen laminar	54
3.4.1. Postproceso.....	54
3.4.1.1. Simulaciones equivalentes a ensayos de tracción a punto fijo “modelo sin velocidad de entrada de flujo impuesta por izquierda”	54
3.4.1.1.1. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en el ensayo	54
3.4.1.2. Simulaciones equivalentes a ensayos de propulsor aislado “modelo con velocidad de entrada en izquierda”	56
3.4.1.2.1. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en el ensayo	56
4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	
4.1. Elección del modo de desplazamiento y del mecanismo de accionamiento....	59
4.1.1. Antecedentes de superficies propulsoras.....	59

INDICE

4.1.2.	Superficies propulsoras consideradas para el prototipo objeto de diseño ..	59
4.1.2.1.	Superficie propulsora tipo aleta anal emulando el modo de nado <i>gymnotiforme</i> (MPF)	60
4.1.2.1.1.	Accionamiento mediante levas.....	60
4.1.2.1.2.	Accionamiento mediante sistemas biela-manivela ...	61
4.1.2.1.3.	Accionamiento mediante excéntricas.....	63
4.1.2.2.	Superficie propulsora que emula el modo de nado <i>anguiliforme</i> (BCF)	64
4.1.2.2.1.	Accionada mediante excéntricas y ejes articuladores que describen movimientos de rotación	66
4.1.2.2.2.	Accionada mediante excéntricas y ejes articuladores que describen movimientos armónicos lineales	67
4.2.	Análisis cinemático del mecanismo propuesto	70
4.2.1.	Introducción	70
4.2.2.	Metodología	70
4.2.2.1.	Expresiones de la posición así como de la longitud del ‘segmento de forma de onda’ en el doble eslabonamiento manivela - corredera, 1 grado de libertad	70
4.2.2.1.1.	Expresión de la posición de la corredera en el eslabonamiento de tres barras manivela-corredera.....	71
4.2.2.1.2.	Expresión de la posición del ‘segmento de forma de onda’: ángulo que forma con el plano horizontal (pitch).....	72
4.2.2.1.3.	Expresión de la posición del ‘segmento de forma de onda’: desplazamiento vertical de su centro geométrico (heave)	74
4.2.2.1.4.	Expresión de la longitud del ‘segmento de forma de onda’	75

4.2.2.2.	Expresión de la velocidad y aceleración angulares de un segmento de membrana accionado por dos correderas desfasadas entre sí un octavo de periodo.....	76
4.2.2.2.1.	Expresión de la velocidad de la corredera en el eslabonamiento de tres barras manivela – corredera	76
4.2.2.2.2.	Expresión de la aceleración de la corredera en el eslabonamiento de tres barras de manivela – corredera	77
4.2.2.2.3.	Expresión de la velocidad angular de un segmento de membrana	78
4.2.2.2.4.	Expresión de la aceleración angular de un segmento de membrana	79
4.2.3.	Conclusiones.....	81
4.3.	Diseño de la excéntrica.....	82
4.4.	Diseño del eje.	84
4.4.1.	Equilibrado radial teórico del eje.....	84
4.4.2.	Diseño del soportado del eje.....	87
4.4.2.1.	Datos de partida	88
4.4.2.1.1.	Propiedades de la geometría de la pieza.....	88
4.4.2.1.2.	Propiedades del material.....	88
4.4.2.1.3.	Cargas dinámicas incluidas	89
4.4.2.2.	Simulación	89
4.4.2.2.1.	Hipótesis 1	89
4.4.2.2.2.	Hipótesis 2	91
4.4.2.2.3.	Hipótesis 3	93
4.4.2.2.4.	Hipótesis 4	95

INDICE

4.4.2.2.5. Hipótesis 5.....	97
4.4.2.2.6. Hipótesis 6.....	97
4.4.2.3. Conclusiones.....	97
4.5. Motor y transmisión.....	100
4.6. Diseño de la estructura	102
4.7. Construcción del casco.....	104
4.7.1. Diseño del casco.....	104
4.7.2. Sellado del casco	105
4.7.2.1. Consideraciones previas	105
4.7.2.2. Primer intento	107
4.7.2.3. Segundo intento	107
4.7.2.4. Tercer intento.....	108
4.7.2.5. Cuarto intento	109
4.7.3. Modificación al diseño original.....	110
5. ENSAYOS EN TANQUE	
5.1. Tanque de ensayo.....	113
5.2. Sistema de adquisición de datos.....	115
5.2.1. Captura de señal, velocidad de rotación del eje motor.....	116
5.2.2. Captura de señal, fuerza de tracción del prototipo	117
5.2.3. Captura de señal, par entregado por el motor eléctrico.....	117
5.2.4. Emisión de señal consigna de frecuencia del variador de velocidad	118
5.2.5. Tarjeta de adquisición de datos	118
5.2.6. Software adquisición de datos.....	118
5.3. Realización de ensayos.....	119
6. CONCLUSIONES	

6.1. Conclusiones.....	121
6.1.1. Modelo CFD	121
6.1.2. Prototipo	121
6.1.3. Pruebas en tanque	121
6.1.4. Se fijan los cimientos de na nueva línea de investigación.....	122
6.2. Aportaciones originales.....	122
6.3. Trabajo futuro	124
7. BIBLIOGRAFIA	127

APENDICES

APÉNDICE 1: UDF'S SÓLIDOS RÍGIDOS

APÉNDICE 2: UDF FORMA ONDA CONTINUA

APÉNDICE 3: CONFIGURACIÓN DE AJUSTES DEL TACÓMETRO

APÉNDICE 4: ESQUEMA CONEXIONADO INSTRUMENTACIÓN

APÉNDICE 5: CIRCUITOS DE ADAPTACIÓN DE SEÑAL

APÉNDICE 6: PANTALLA DE EXPLOTACIÓN

INDICE

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace millones de años los peces han desarrollado habilidades en su desplazamiento por el agua, en numerosos aspectos muy superiores a las conseguidas a día de hoy por la tecnología y ciencia navales. Instintivamente, emplean su forma hidrodinámica para explotar principios de la mecánica de fluidos logrando extraordinarias eficiencias en su propulsión, aceleración y maniobrabilidad de una manera tal que los ingenieros de diseño naval en la actualidad apenas pueden establecer como ideales.

Es bien sabido que el atún puede nadar a gran velocidad y con alta eficiencia, el lucio puede alcanzar elevadas aceleraciones y la anguila es capaz de nadar con habilidad en espacios muy reducidos. Estas sorprendentes capacidades para nadar inspira los investigadores para mejorar el rendimiento de los sistemas de propulsión de artefactos marinos.

Durante parte del pasado siglo y con mayor intensidad a partir de los primeros años noventa, un gran número de grupos de investigación de universidades en Europa, Asia y Estados Unidos han invertido grandes recursos en investigar formas de propulsión marina de inspiración biológica.

La PLATAFORMA TECNOLÓGICA EUROPEA DEL SECTOR NAVAL (WATERBORNE) contempla en su Agenda de Desarrollo Estratégico, Anexo 2, pto. 2.2.2.1 que *“la mejora significativa en el rendimiento de los propulsores marinos requerirá configuraciones más complejas de los mismos, incluso conceptos radicalmente nuevos como diseños biomecánicos...”*

Expected Research Outcomes

- **2012** *Large scale bio-mechanical propulsors demonstrate big efficiency gains*
- **2012** *Propulsor design integrated with hull design models*
- **2015** *Large area propulsors integrated into new SSS designs*

Por su parte, otra importante plataforma tecnológica de ámbito europeo, EMECRid, grupo encargado de I+D+i perteneciente al EUROPEAN MARINE EQUIPMENT COUNCIL (EMEC), en su Research Strategy Document (2006) contempla:

1. INTRODUCCIÓN

“Large area (paddle wheel, ‘whale tail’ or bio mechanical) propulsors offer major improvements in propulsion efficiency. Efficient robust actuator technology is required to realise these concepts in practice”

Route Map

- 5 Years: *Large scale bio-mechanical propulsors demonstrate big efficiency gains*
- 15 Years: *Europe dominates new bio-mechanical propulsion market*

1.1. Clasificación de los diversos modos de locomoción de los peces

Para mejor comprensión del contenido del presente capítulo se clasifican a continuación los tipos de aletas que puede tener un pez o un mamífero marino:

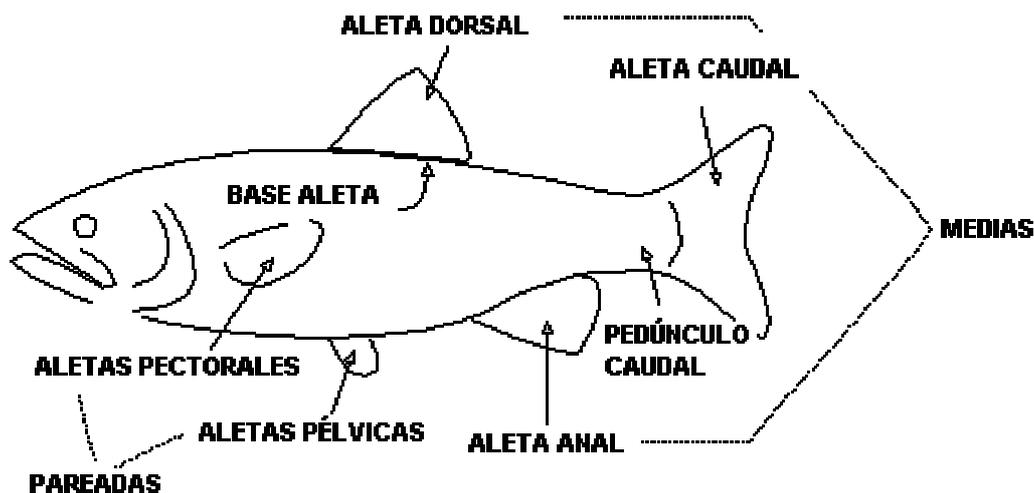
Pareadas:

- Aletas pectorales
- Aletas pélvicas

Medias:

- Aleta dorsal
- Aleta anal
- Aleta caudal

Fig. 1 Clasificación y ubicación de las aletas en los peces



Las aletas tipo medias y pareadas pueden ser de base corta o de base larga dependiendo de la longitud de su base en comparación con la longitud total del pez.

1.1.1. Clasificación de los modos de propulsión atendiendo a la temporalidad

Los peces muestran diversidad de movimientos, que se pueden clasificar en natatorios y no natatorios. Estos últimos incluyen acciones concretas como saltar, excavar, volar, deslizarse, propulsarse mediante chorro, etc. Los movimientos natatorios han sido clasificados en dos categorías genéricas:

- **Nado periódico (o estable o sostenible)**, caracterizado por una repetición cíclica de un movimiento sostenible. Este nado periódico es empleado por los peces en cubrir largas distancias a una velocidad más o menos constante.
- **Nado transitorio (o inestable)**, que contempla los inicios rápidos de movimiento, maniobras de escape y giros. Los movimientos transitorios son de una duración de milisegundos y son típicamente empleados para la captura de presas o bien para evadirse de sus depredadores.

El nado periódico es el que ha sido, desde siempre, objeto del interés de los científicos. Esto ha sido debido a que el nado transitorio es mucho más difícil de ensayar, verificar y repetir comparado con el nado estable o periódico.

1.1.2. Atendiendo a la estructura propulsora empleada

Se describe una clasificación ideada por Breder en 1926 y actualizada por Webb en 1994 en la cual relaciona los tipos de propulsor con la cinemática, comportamiento locomotor y fibras musculares empleadas, creando el concepto de *swimming gaits*.

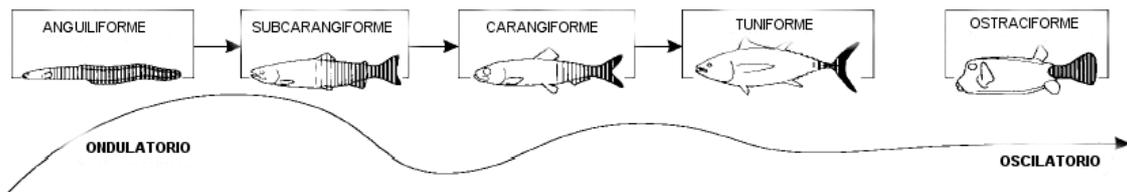
1.1.2.1. Locomoción BCF

La mayoría de los peces se impulsan arqueando sus cuerpos, imitando una forma de onda que se desplaza en dirección opuesta a la de avance del pez hasta extenderse hacia su aleta caudal. Este tipo de forma de desplazamiento es el conocido como *Body and/or Caudal Fin (BCF) Locomotion*.

El tipo de locomoción BCF es a su vez clasificado en otras cinco subcategorías: cuatro de las cuales emplean una forma de propulsión ondulatoria mientras que la última emplea un tipo de propulsión oscilatoria.

1. INTRODUCCIÓN

Fig. 2 Tipos de propulsión BCF (Lindsay 1.978)



En las formas de propulsión BCF tipo ondulatorias la onda propulsiva recorre el pez en dirección opuesta a la de su avance y a una velocidad mayor que la de desplazamiento del pez. Las cuatro formas citadas en el gráfico se distinguen no sólo en la amplitud de la onda propulsiva sino que además cabe destacar que el tipo de propulsión tuniforme se sirve de un mecanismo de control de la vorticidad generada, frente a los otros tres métodos, que explotan el principio basado en el incremento de la cantidad de movimiento del fluido impulsado.

- a. **Tipo anguiliforme:** encontrada en la anguila, lamprea, pez aguja, etc. es un sistema de locomoción ondulatorio puro en el cual participa la mayor parte o incluso todo el cuerpo del pez. La amplitud de la onda se incrementa en dirección a la cola. La inclusión de al menos una longitud de onda de la onda propulsiva en el cuerpo del pez implica que las fuerzas laterales se cancelen minimizando la tendencia del cuerpo al viraje.
- b. **Tipo subcarangiforme:** similar al modo de locomoción de la de la trucha. Se caracteriza porque la amplitud de la onda se incrementa sensiblemente en la mitad posterior del pez.
- c. **Tipo carangiforme:** empleado por el salmón. Las ondulaciones del cuerpo se restringen a su último tercio y el empuje es aportado mayormente por una endurecida aleta caudal. Puesto que se pierde menos energía en la impulsión lateral de agua y en la formación de vórtices, la eficiencia propulsiva se mejora y eso permite a estas formas de propulsión ser más rápidas que las de tipo subcarangiforme o que las de tipo anguiliforme. Sin embargo es esta misma característica de su forma de movimiento lo que restringe sus habilidades en cuanto al giro o a la aceleración. Además existe una tendencia lógica al retroceso dado que las fuerzas laterales están concentradas en la parte posterior del cuerpo. Lighthill identificó dos adaptaciones en el cuerpo de estas especies fruto de la evolución a lo largo de los tiempos con objeto de minimizar esta citada

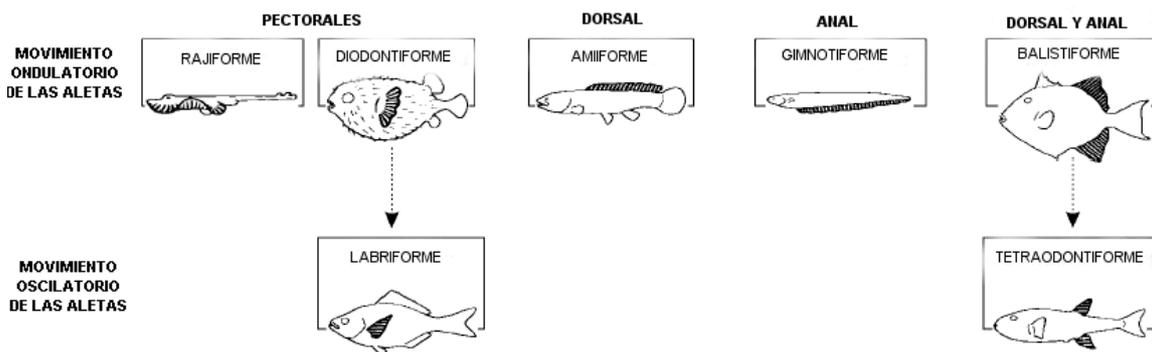
tendencia al retroceso: (a) una reducción en la profundidad del cuerpo del pez en el punto de encuentro de la aleta caudal con el tronco (b) concentración del volumen y masa del pez en su parte anterior.

- d. **Tipo tuniforme:** el empleado por el atún. Es, de lejos, el más eficiente modo de locomoción que se puede hallar en el entorno acuático. El empuje es generado mediante un mecanismo de control de la vorticidad permitiendo con ello mantener altas velocidades de crucero durante largos periodos de tiempo. Únicamente tienen lugar movimientos laterales significativos en la aleta caudal y en la zona de unión de ésta con el tronco del pez (pedúnculo). El cuerpo de las especies que lo emplean tiene un perfil muy hidrodinámico.
- e. **Tipo ostraciforme:** el empleado por el pez cofre, es el único tipo de locomoción BCF puramente oscilatorio. Se caracteriza por una oscilación (similar a un péndulo) de la aleta caudal mientras que el cuerpo permanece rígido. Los peces que emplean este tipo de locomoción suelen emplear a baja velocidad una propulsión tipo MPF (expuesta a continuación) mientras que activan la oscilación de su aleta caudal con el objeto de obtener el empuje adecuado para una alta velocidad. En general su forma de nado es bastante ineficiente.

1.1.2.2. Locomoción MPF

En contrapartida, ciertas otras especies han desarrollado formas de nado empleando sus aletas medias y pectorales, lo que se conoce como *Median and/or Paired Fin (MPF) Locomotion*. Se estima en un 15% las especies que emplean la locomoción tipo MPF como modo rutinario de desplazamiento, mientras que en un porcentaje mucho mayor, las especies que típicamente emplean el modo de locomoción tipo BCF para su desplazamiento, emplean el modo MPF para maniobra y estabilización.

Fig. 3 Tipos de propulsión MPF (Lindsay 1.978)



1. INTRODUCCIÓN

1.2. Antecedentes y referencias a trabajos de investigación sobre sistemas de propulsión marina biológicamente inspirados

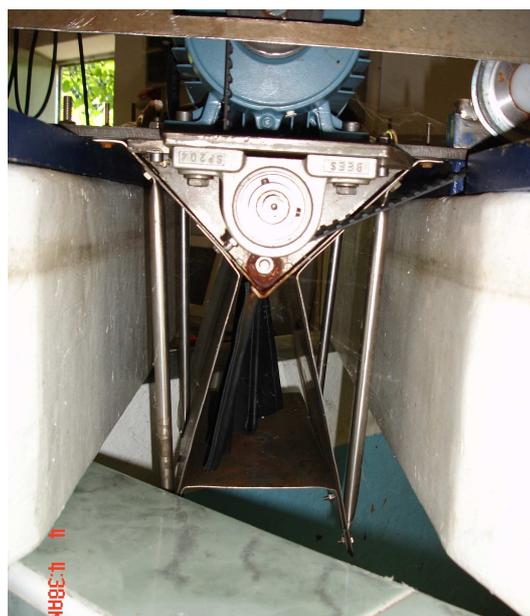
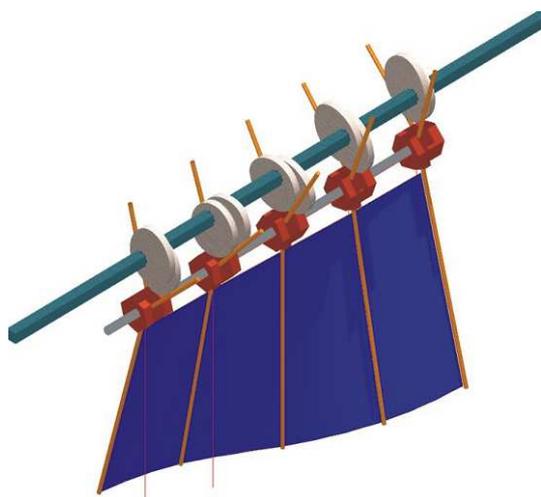
1.2.1. Universidade da Coruña

A mediados de los años 90 (y con inspiración en un prototipo ya desarrollado a principios de los 80 por el Dr. Primitivo González) en la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de A Coruña se construyó un prototipo de propulsor que emplea como medio de impulsión una membrana flexible construida con neopreno y armada, a modo de aleta, sobre una serie de varillas metálicas, accionadas éstas mediante levas. Este desarrollo fue protegido mediante patente: ES 2170004 A1 (UNIV DE A CORUÑA) 16.07.2002. El eje de levas se acciona mediante un par de rotación suministrado por medio de motor eléctrico de inducción (0,75 Kw) gobernado por un variador de frecuencia.

Como se aprecia en las imágenes (Fig. 4), este prototipo genera una superficie ondulante similar a la originada por una generatriz, cuyo extremo superior mantiene una trayectoria recta mientras que el inferior se desplaza de forma sinusoidal. El propulsor fue montado sobre una plataforma tipo catamarán y ensayado en el tanque de pruebas de la EUP de la Universidad de A Coruña construido al efecto.

El modo de desplazamiento del prototipo sería tipo MPF, mediante empleo de aleta anal, de un modo que se asemeja a la forma de natación del pez cuchillo.

Fig. 4 Prototipo de propulsor ondulatorio desarrollado en la UDC



(a) Principio de funcionamiento del prototipo

(b) Imagen del prototipo construido

Posteriormente fue fabricada una estructura hueca de forma triangular y montada sobre el prototipo con el fin de confinar el caudal generado por la superficie ondulante y, de este modo, incrementar el rendimiento propulsivo (Fig. 4b)

El objetivo último marcado en la línea de trabajo que, sobre propulsión marina de inspiración biológica, está desarrollando el equipo de investigación Innovacións Mariñas (Dpto Construcción Navais - UDC) es el de obtener una forma de onda y un mecanismo capaz de generarla, de tal manera que realmente sea posible la obtención de una potencia significativa de propulsión.

Con el objetivo mencionado y una vez detectadas las deficiencias del anterior prototipo se establece como nuevo hito el diseño, construcción y ensayo de un nuevo prototipo, así como el estudio de su comportamiento y posibles modificaciones a realizar con objeto de mejorar sus prestaciones, mediante técnicas de CFD (Computing Fluid Dynamics)

En el año 2005 se detecta que la idea perseguida por el Dr. Primitivo B. González, investigador principal del grupo y “padre” del invento converge con la visión de futuro de importantes plataformas tecnológicas europeas del sector marítimo, por tanto se decide buscar financiación en convocatorias públicas.

En el año 2006 se obtiene una subvención en convocatoria pública, imprescindible para la financiación de los trabajos de investigación incluidos en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral:

- Título: SISTEMA DE PROPULSIÓN ONDULANTE
- Código: PGIDIT06DPI172PR8
- Investigador principal: PRIMITIVO B. GONZÁLEZ LÓPEZ
- Entidad financiadora: XUNTA DE GALICIA – PGIDIT 2.006
- Duración: de 15 / 12 / 06 a 15 / 12 / 09

1.2.2. Otros antecedentes

1.2.2.1. El ingeniero naval Juan José Chico y Gárate

En junio de 1.955 la revista INGENIERIA NAVAL publica el artículo *Algunas ideas sobre propulsión ondulatoria* del ingeniero naval Juan José Chico y Gárate.

En este trabajo el autor aborda la posibilidad de utilizar como propulsor una lámina flexible en la que se producen ondulaciones haciendo oscilar su borde anterior. Por

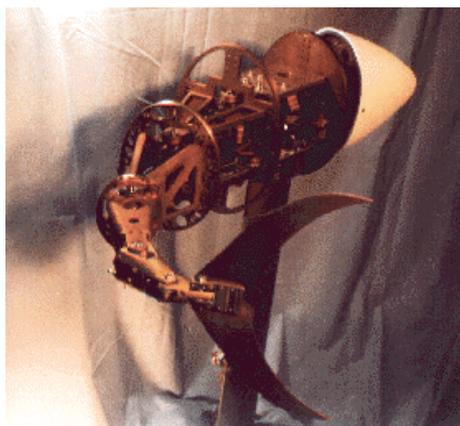
1. INTRODUCCIÓN

medio de unas hipótesis sencillas, se hace un cálculo del empuje y del rendimiento de un propulsor de este tipo y, finalmente, se describen algunas disposiciones constructivas que podrían presentar un propulsor de este tipo

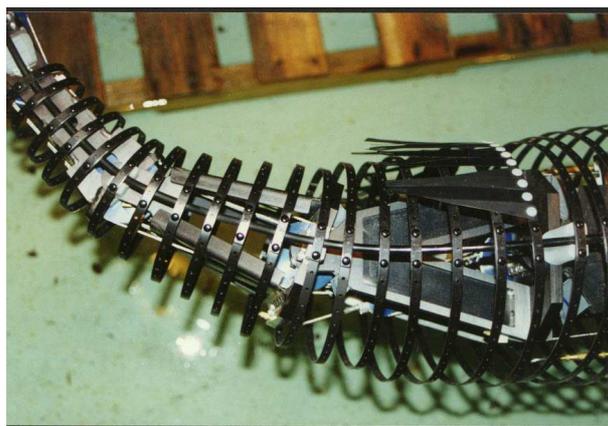
1.2.2.2. El Massachussets Institute of Technology – MIT (USA)

En 1.994 fue desarrollado por el MIT el primer pez-robot, de 132 cm de longitud, dentro del proyecto *RoboTuna*, con el objeto de obtener un sistema de propulsión más eficiente para vehículos submarinos autónomos (AUVs). Como modelo fue escogido el atún por su velocidad (el atún común llega a alcanzar 74 km/h). El robot se construyó sobre la base de un esqueleto formado por nueve vértebras (de madera el primer prototipo, metálicas el segundo) articuladas entre sí mediante poleas y recubierto de una piel elaborada con una capa fina de espuma recubierta de *lycra*. El robot fue ensayado en el interior del tanque de pruebas del MIT, pero siempre trabajó suspendido de un soporte rígido.

Fig. 5 Prototipos proyectos RoboTuna



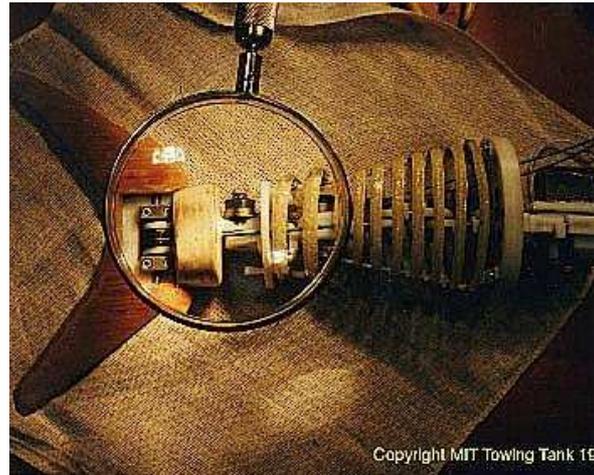
(a) Prototipo original Charlie 1 (1.994)



(b) Prototipo construido en 1.999

A finales de los 90 fue desarrollado por el MIT un prototipo de robot lucio de 81 cm de longitud. El lucio interesa a los investigadores por la increíble aceleración (del orden de 8G) que este pez es capaz de poner en juego. Este prototipo, a diferencia del anterior, sí podía nadar libremente en el interior del tanque de pruebas del MIT aunque conectado con el exterior mediante un umbilical. El pez recibe las órdenes de un operador y una computadora traduce esas órdenes sencillas en las órdenes adecuadas para cada actuador que interviene en el gobierno del cuerpo del pez. Fue construido con un exoesqueleto de fibra de vidrio en forma de espiral.

Fig. 6 Prototipo proyecto Robopike



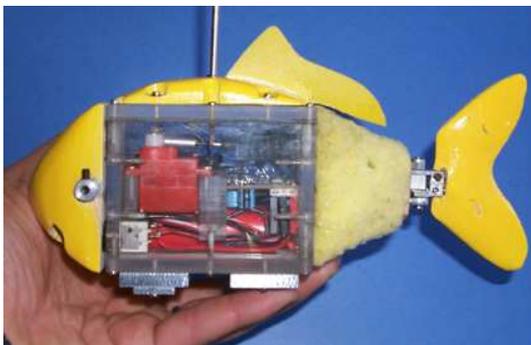
(a) Prototipo Wanda construido en 1.997

(b) Detalle de la articulación de la aleta caudal

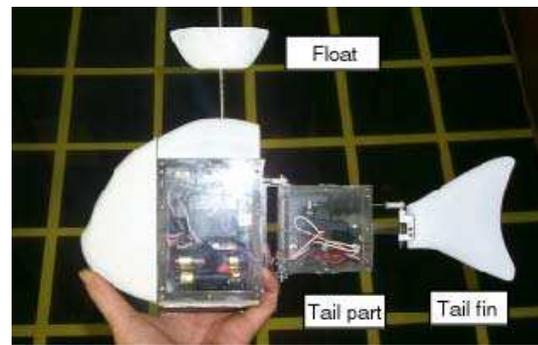
1.2.2.3. Nacional Maritime Research Institute de Japón (NMRI)

La División de Ingeniería de Energía y Potencia de la NMRI desde finales de los años 90 ha estado trabajando en el desarrollo de numerosos prototipos de pez robot (7 prototipos de la serie PF y 10 prototipos de la serie PPF) con el objeto de lograr aplicar, en un futuro, la habilidad propulsiva de los peces a los vehículos acuáticos.

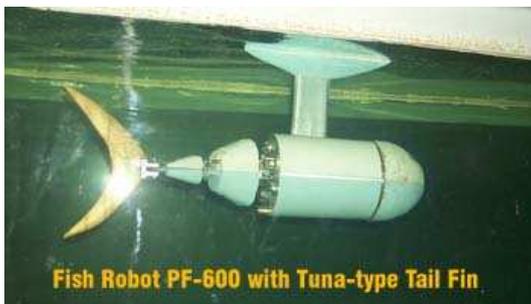
Fig. 7 Principales prototipos de pez robot desarrollados por la NMRI para el estudio de la mejora del rendimiento propulsivo



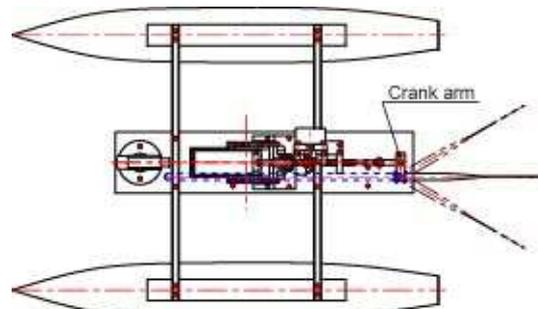
(a) PPF-04



(b) PF-300

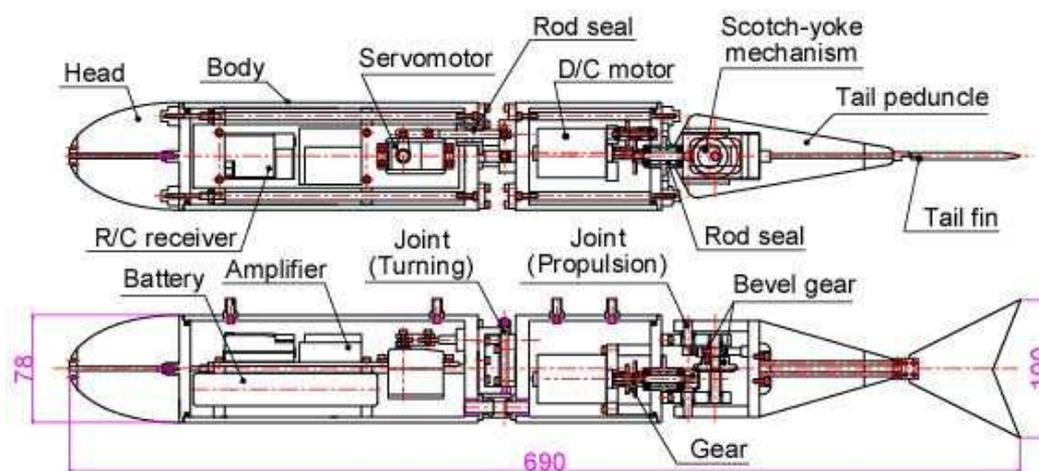


(c) PF-600



(d) FPSE 2000

1. INTRODUCCIÓN



(e) FPSE 2000

El **PPF-04** es un pequeño pez robot de 19 cm y 400 g, con movimiento tipo carangiforme y telemandado. Su tamaño permite realizar pruebas en un tanque pequeño (del tamaño de una bañera). El estudio realizado, permitió establecer una relación entre la velocidad del robot y la amplitud de las oscilaciones de su aleta caudal, así como entre el patrón de movimiento y la capacidad de viraje.

El **PF-300** es un pez robot, de diseño inspirado en una dorada, construido para trabajar en la optimización de la velocidad de giro. Posteriormente se empleó para determinar la relación entre velocidad de movimiento en línea recta y la amplitud de aleteo, frecuencia de aleteo y ángulo de fase entre el movimiento del pedúnculo y la aleta caudal.

El **PF-600** (60 cm longitud) fue diseñado y construido para medir rendimiento propulsivo. Fue diseñado buscando reproducir los movimientos y la capacidad de aceleración del lucio así como el rendimiento y velocidad de nado del atún. Inicialmente era accionado por dos servos, y posteriormente se estudió su accionamiento por medio del empleo de un motor Stirling

Para investigar el rendimiento del motor así como los posibles problemas de adaptación de un motor semi-Stirling de pistón libre para un pez-robot, fue desarrollado un prototipo de barco: S-FPSE 2000, incluyendo un propulsor, accionado por motor Stirling, a modo de aleta caudal de pez

El **PF-700** se construyó, inspirado en el lucio-caballa, con el objetivo de conseguir desplazarse a alta velocidad. Mide 700 mm de longitud y 80 mm de diámetro. Se

compone de una cabeza, un cuerpo principal, una caja para el mecanismo actuador, un pedúnculo y una aleta caudal

1.2.2.4. Beijing University of Aeronautics & Astronautics (BUAA)

Existen en China diversos grupos de investigación que trabajan en el desarrollo de peces robot:

El Instituto de Automatización de la Academia China de las Ciencias tiene un proyecto en curso sobre el control y coordinación de múltiples peces robot.

Existe también un grupo de investigación centrado en la hidrodinámica y el mecanismo de nado de los peces en la Universidad de Ciencias y Tecnología de China. Otros grupos de la Universidad Huazhong de Ciencia y Tecnología, la Universidad de Ingeniería de Harbin, etc, han trabajado sobre el nado de los peces.

En el Instituto de Robótica en BUAA se está trabajando en la estructura mecánica y el sistema de accionamiento de los peces robot, con un interés centrado en la velocidad, la eficiencia y la estabilidad de los peces robot. Se encuentran en construcción varios prototipos de peces robot

Fig. 8 Principales prototipos de pez robot desarrollados por el Instituto de Robótica en BUAA



(a) Robot anguila



(b) SPCII



(c) SPC-03

1. INTRODUCCIÓN

A principios de 1999, el Instituto de Robótica de BUAA planteó una teoría de propulsión de peces - "Undulate Propulsión Theory" y sobre la base de la misma, el primer robot anguila vio la luz . Este pez robot de control remoto mide 0,8 metros de longitud, y puede alcanzar la velocidad máxima de 0,6 m / s a la frecuencia de 2 Hz

El "SPCII" . Emplea un sistema de posicionamiento global (GPS), que le permite deambular de forma independiente. Su velocidad máxima es de 1,16 veces su longitud por segundo, que sería de los mejores ratios obtenidos hasta ahora en el mundo. Sus características técnicas son: 1,2 m long, 40 kg, 300 W pot. propuls., 2m prof navegación, 3 – 10 h autonomía

El **SPC-03** (2.004) mide 1,23 metros de largo y se asemeja a un pez tanto por su forma como por sus movimientos. Es estable, muy práctico, y es controlado en forma remota por los técnicos. Puede trabajar de 2 a 3 horas en inmersión, con una velocidad máxima de 4 km/h. Este pez robot está destinado a la exploración arqueológica submarina, pero se espera que sea capaz de muchos otros usos, como la fotografía submarina, la cartografía de los fondos bajo el agua, el transporte de objetos pequeños ...

1.2.2.5. Universidad de Essex (Reino Unido)

El Grupo de Investigación Robótica Centrada en Humanos de la Universidad de Essex ha estado desarrollando desde el año 2.002 una serie de peces robot. El objetivo buscado era el de lograr un prototipo que pudiese nadar como un pez real y que tuviese un comportamiento autónomo. Un pez tiene varios modos de desplazamiento (traslación, giros, aceleraciones, frenadas) y el desafío de los investigadores de Essex era obtener un pez-robot que pudiese optar por reproducir todos estos comportamientos según un criterio propio. Por consiguiente, fueron indexados los distintos comportamientos del pez en una biblioteca, la cual utiliza el ordenador para generar trayectorias variadas e inesperadas del robot.

Han sido elaborados diversos diseños: desde el prototipo denominado G1 en 2003 hasta el G8 y G9 en 2005. Los investigadores continúan trabajando en la mejora de los algoritmos de formación que permiten al robot generar conductas adaptativas en un entorno cambiante e impredecible.

Fig. 9 Prototipo de pez robot, denominado G-9, desarrollado en la Universidad de Essex



Los peces robot de la serie G desarrollados en Essex mostraron muy buen rendimiento en el nado 2D. Por ejemplo, la velocidad lineal máxima de nado en línea recta es 0,8 m/s aproximadamente (alrededor de 1,0 L/s de longitud de cuerpo por segundo) y la velocidad angular máxima en el comportamiento denominado C-shape Sharp Turning (CST) es de 110 grados / segundo

1.2.2.6. Universidad de Tartu (Estonia)

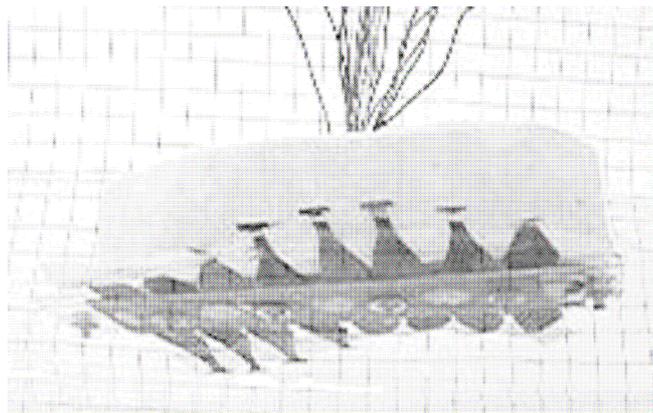
En el Instituto de Tecnología de la Universidad de Tartu fue diseñado y construido un robot submarino impulsado por aletas pectorales a modo de pez raya. Dichas aletas pectorales fueron construidas empleando polímeros electroactivos. Los experimentos han mostrado que las aletas construidas de este modo son capaces de generar movimiento ondulante e impulsar la cuerpo hacia delante. La velocidad del dispositivo es considerablemente más lento que la de los peces raya, pero el dispositivo tiene una proporción de masa muscular sensiblemente menor que los animales acuáticos.

Los polímeros electroactivos (PEA) son materiales que cambian su forma en respuesta a la presencia de un campo eléctrico. Su principio de trabajo se asemeja estrechamente al comportamiento de los músculos biológicos y por lo tanto estos materiales son considerados como una nueva tecnología emergente para los actuadores de los robots.

Las ventajas de los PEA en comparación a los tradicionales dispositivos electromecánicos son su bajo consumo de energía, movimiento silencioso y flexibilidad permanente. Dado que los dispositivos construido en los actuadores EAP tienen baja concentración de metales, es difícil de detectar por los radares detectores de metales o radares. Por lo tanto, son candidatos prometedores para el reconocimiento, recopilación de información y vigilancia. Los materiales EAP son ligeros y permiten la construcción de dispositivos de pequeño tamaño.

1. INTRODUCCIÓN

Fig. 10 Prototipo de robot submarino desarrollado en la Universidad de Tartu



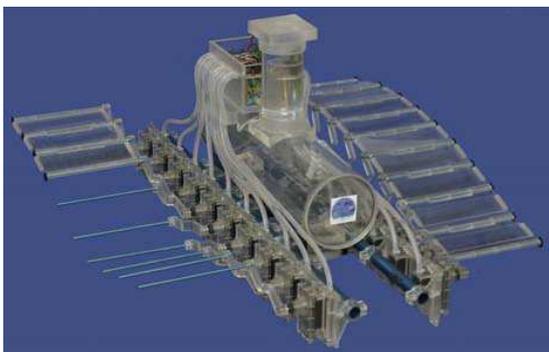
Cada una de las aletas consta de 8 músculos. La longitud de la aleta es 110mm. Cada músculo en forma de botella mide 40 mm de largo, 13 mm de ancho en la parte más amplia en que se une a la estructura y 4 mm de ancho en el lugar más estrecho.

Los músculos de la aleta están conectados mecánicamente mediante una lámina delgada de látex. Los músculos se mecanizan a partir de hojas de Ionic Polymer Metal Composites (IPMC) de 0,2 a 0,5 mm de espesor, proporcionadas por Musclesheet™. La hoja es una película de polímero electroactivos recubierta con una capa de platino

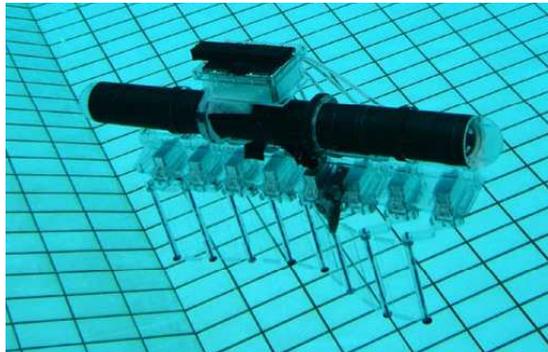
1.2.2.7. Universidad Tecnológica de Nanyang (Singapur)

En la Escuela de Mecánica e Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Tecnológica de Nanyang, a partir del año 2004 fueron construidos y ensayados sistemas de propulsión ondulatorio en prototipos que imitaban el modo de desplazamiento del pez raya, del pez cuchillo, anguila, etc. empleando para ello aletas mecánicas accionadas mediante una serie de servomotores. El conjunto de servomotores es gobernado por procesador. De esta manera es posible variar la frecuencia, amplitud, secuencia y forma de cada onda únicamente mediante software.

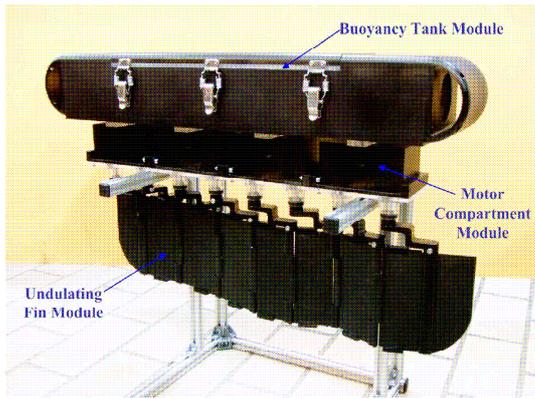
Fig. 11 Prototipos de robot submarino desarrollados en la Universidad de Nanyang



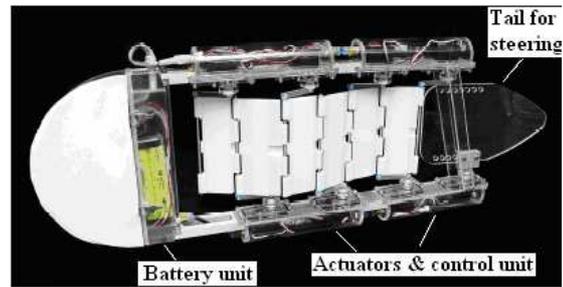
(a) Robot sepia



(b) NKF-I: Robot pez-cuchillo



(c) NKF-II: Robot pez-cuchillo



(d) NKF-III: Robot anguila

Robot sepia: Peso: 10 kg, membrana construida de material: acrílico, Longitud de onda: 85 cm

Robot pez-cuchillo (NKF-I): Peso: 6,2 kg, Longitud de onda: 63 cm, Ancho de onda: 20 cm, Máx amplitud pico a pico: 10 cm, Longitud máxima de segmento: 89 mm

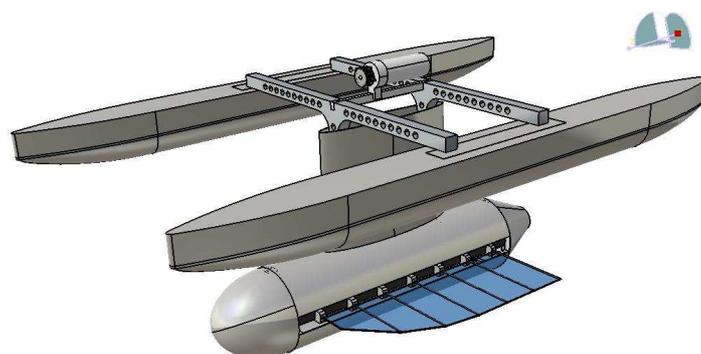
Robot pez-cuchillo (NKF-II): Longitud biela: 60 mm, Distancia entre dos servos: 70 mm, Máxima amplitud de onda: 41 mm, Longitud mínima de segmento: 51 mm, Longitud máxima de segmento: 89 mm, Máximo ángulo entre biela y plano crujía: $\pm 43^\circ$, Desfase entre servos consecutivos: $30^\circ < \beta < 90^\circ$

Robot anguila (NKF-III)

1.2.2.8. Universidad Tecnológica de Cracovia (Polonia)

La primera embarcación que se construyó en el Proyecto Kalmar (Polonia, año 2007) fue un prototipo experimental, gobernado por control remoto: una versión simplificada de la invención puesto que el objetivo fue estudiar las características básicas del actuador de la onda propulsora. El vehículo estaba equipado con una plataforma de desplazamiento a modo de catamarán y un propulsor totalmente sumergido en el agua.

Fig. 12 Prototipo de robot desarrollado en Kalmar Project



1. INTRODUCCIÓN

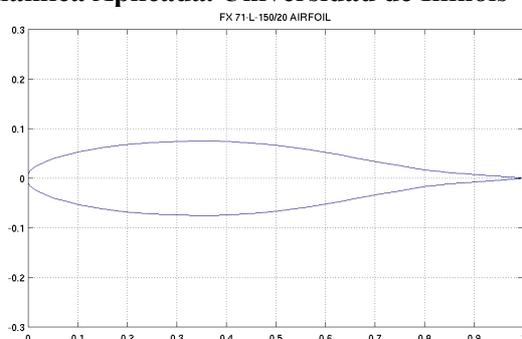
Esta disposición fue utilizada para estudiar el rendimiento de la máquina, incluida la eficiencia hidrodinámica, la aceleración y la velocidad máxima.

1.2.2.9. Universidad de Delft (Holanda)

Galatea Project es un proyecto de la facultad de ingeniería aeroespacial de la Universidad de Delft. El objetivo es diseñar, construir y probar un vehículo submarino autónomo biológicamente inspirado.

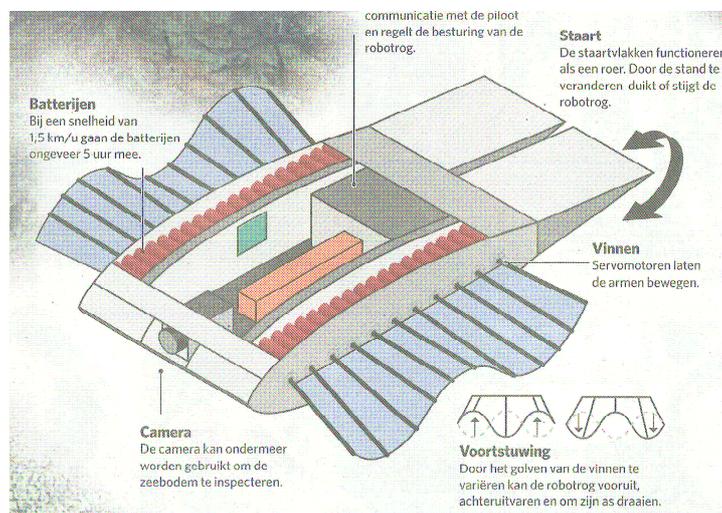
El diseño del prototipo, comprende cuatro aspectos: hidrodinámica, propulsión, sistemas de control de movimiento y la carga útil. La forma del casco se basa en una modificación del perfil aerodinámico Wortmann FX 71-L-150/20.

Fig. 13 Perfil aerodinámico Wortmann FX 71-L-150/20 (fuente: web del Grupo de Aerodinámica Aplicada. Universidad de Illinois – UIUC)



Fueron realizadas pruebas en túnel de viento con el fin de determinar los coeficientes de las fuerzas de sustentación y arrastre. El sistema de propulsión está basado en el movimiento de una aleta ondulante biológicamente inspirada. El gobierno durante la navegación se realiza de modo manual pero el objetivo es llegar a conseguir un artefacto totalmente autónomo. Cada aleta es accionada por 17 servomotores Futaba S 3306, Longitud de onda: 630 mm, Anchura de aleta: 100 mm

Fig. 14 Prototipo de robot desarrollado en Galatea Project

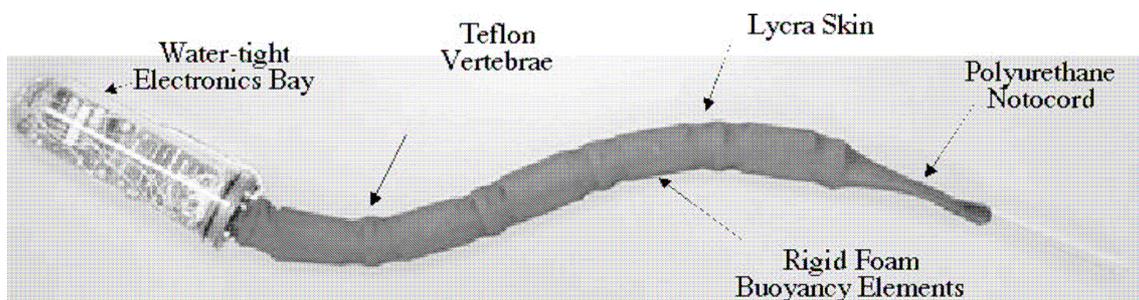


1.2.2.10. Northeastern University of Maryland (USA)

En el Centro de Ciencia Marina de la Universidad de Maryland ha sido desarrollado un vehículo subacuático autónomo con base biológica, tomando como modelo un vertebrado simple: la lamprea de mar. El robot consta de una circuitería de control encapsulada en un cilindro de Plexiglás y un ondulator de poliuretano accionados por músculos artificiales fabricados con una aleación con memoria de forma (SMA). El conjunto de sensores incluye un compás, inclinómetros de cabeceo y escora y sonar. Los parámetros de conducta son extraídos mediante técnicas de ingeniería inversa del comportamiento de los organismos objetivo.

La lamprea nada con oscilaciones laterales rítmicas del eje del cuerpo. Dichas ondulaciones incrementan su amplitud desde el morro hasta la cola. Similares ondulaciones propagándose desde la cola hasta el morro provocan un desplazamiento del robot en sentido contrario. La actividad muscular de propagación rítmica, alternativa sobre cada lado el eje del cuerpo de la lamprea, logra esta onda propulsiva. El desplazamiento de la lamprea no está dificultado por la resistencia de aletas pectorales, aleta anal o pélvica. La característica principal del nado de la lamprea es la de su resistencia, no siendo destacable su velocidad.

Fig. 15 Prototipo de robot lamprea



El robot es funcionalmente un sistema de tres componentes: un casco rígido /contenedor de la electrónica (~ 15% del total del cuerpo longitud), un cuerpo flexible eje principal de los actuadores de nitinol (~ 60% de la longitud total del cuerpo), y una delgada cola flexible, pasiva (~ 25% de la longitud total del cuerpo).

1.2.2.11. Laboratorio Draper

En 1.998 el Laboratorio Draper fabricó el primer vehículo submarino no tripulado con control de verticidad (VCUUV) en la propulsión y la maniobra. El VCUUV es un vehículo de investigación autónomo que imita la morfología y modo de desplazamiento

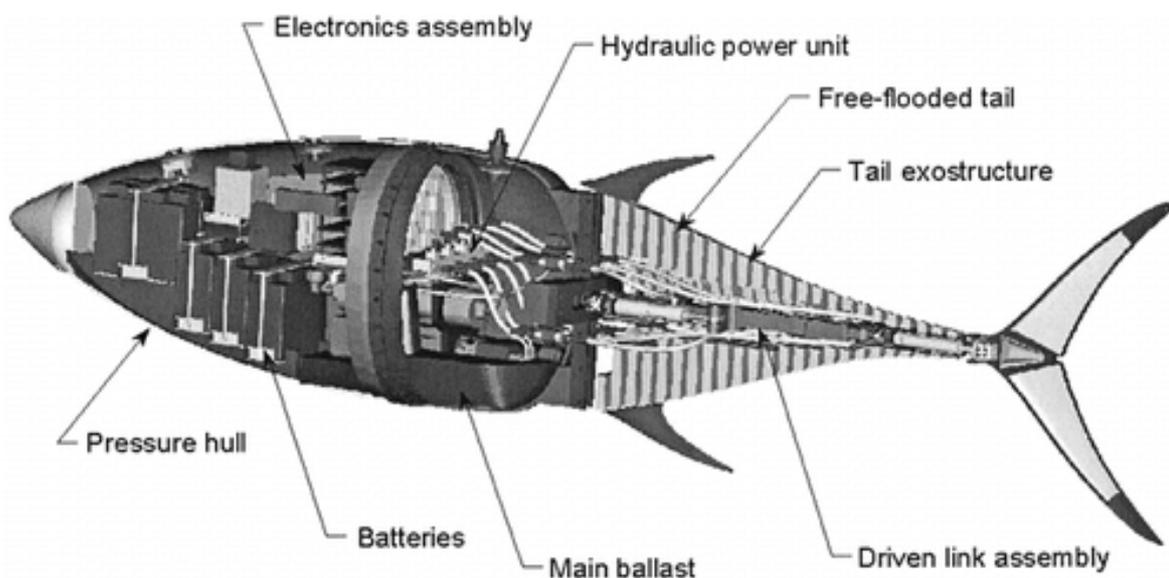
1. INTRODUCCIÓN

del atún yellowfin. Un casco rígido presurizado contiene la parte delantera del robot incluyendo, baterías, electrónica, lastre y grupo hidráulico. La parte posterior es la cola articulada del robot la cual está siempre inundada y termina en una aleta caudal. Empleando los datos cinemáticos de la cola extraídos del RoboTuna del MIT el VCUUV demuestra un comportamiento estable en el nado alcanzando los 2,4 nudos y capacidad de realizar maniobras bruscas con ratios de viraje de hasta 75 grados/seg.

La estructura articulada de la cola consiste en un brazo robot plano de 4 grados de libertad, contenido en un exoesqueleto flexible con forma de atún. La cola entera permanece siempre inundada y cubierta con una piel impermeable que impide el tránsito del agua a través del contorno del robot. Tres eslabones rígidos de igual longitud y la aleta caudal están actuados por cilindros hidráulicos integrados en los propios eslabones de manera independiente.

El VCUUV está equipado con un conjunto de sensores que incluyen: Unidad de Medida Inercial de seis ejes (tres acelerómetros y tres girocompás), cuatro sensores de posición de la cola, profundímetro, así como otros sensores de diagnóstico del propio robot: temperatura interna, presión hidráulica, detector de fugas. Su longitud es de 2,4 m y pesa 133 Kg.

Fig. 16 Prototipo de robot VCUUV



2. OBJETIVOS

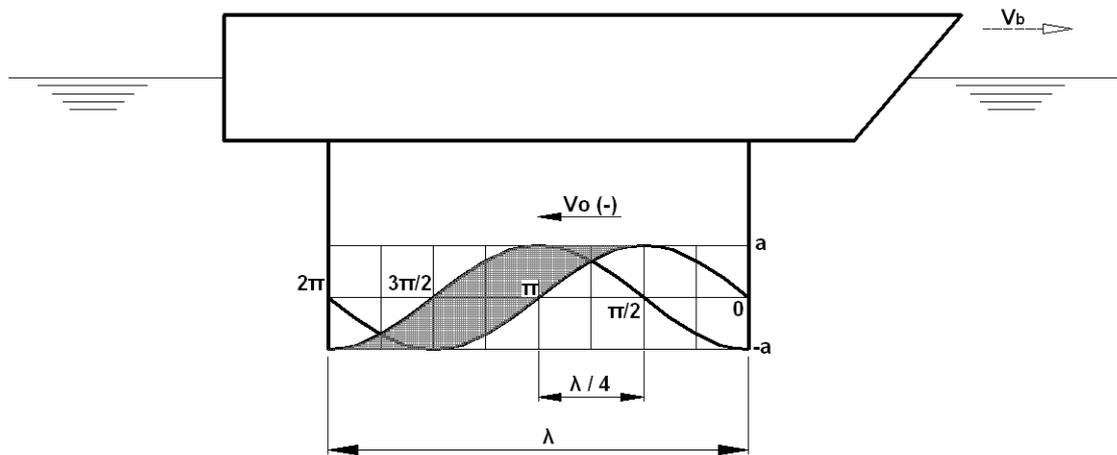
2. OBJETIVOS

2.1. Hipótesis de partida

Un punto de partida para la predicción del comportamiento como propulsor de una superficie ondulante, se encuentra en la teoría enunciada por el Dr. Primitivo B. González en su patente de invención ES 2170004 A1 (UNIV DE A CORUNA) 16.07.2002

Si se genera una superficie ondulante transversal en una membrana ligada a un cuerpo situado en el seno de un fluido, la ondulación generada provoca el desplazamiento de dicho cuerpo en sentido contrario al de avance de la onda.

Fig. 17 Esquema de barco con propulsor ondulatorio



Veamos:

- Densidad del fluido = ρ
- Amplitud de la onda = a (+ a , - a)
- Longitud de la onda = λ
- Período = T
- Frecuencia = $\nu = 1/T$
- Velocidad a la cual el cuerpo se desplaza en el seno del fluido = V_b

Se deduce:

2. OBJETIVOS

- Velocidad de avance de la onda respecto al cuerpo al que va ligada la superficie ondulante = $-\lambda / T = -\lambda v$, que es la misma que la velocidad relativa de salida del fluido respecto a una superficie de control de flujo ligada al cuerpo.
- Llamaremos $V_0 = \lambda / T$, en valor absoluto.
- Velocidad absoluta de salida del fluido = $|-V_0 + V_b| = V_0 - V_b$
- Velocidad absoluta de entrada del fluido = 0 (se consideró que la sección es infinita y se despreciaron los rozamientos y fuerzas de viscosidad en el seno del fluido. El fluido inicialmente está en reposo)

Si consideramos que la membrana se mueve dentro de un conducto de sección transversal rectangular de dimensiones $2a \times b$, 'a' es la amplitud de la onda y 'b' es el ancho del conducto en sentido perpendicular al plano del dibujo), el volumen de fluido desplazado por la membrana hacia la izquierda con respecto al cuerpo a lo largo de un periodo es $2ab\lambda$, o bien el caudal desplazado con respecto al cuerpo por unidad de tiempo es:

$$Q = 2ab \lambda / T = 2ab \lambda v \quad (1)$$

Despreciando las fuerzas de rozamiento viscoso (esto es: considerando el fluido como ideal) y aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento, obtenemos que la fuerza ejercida por la membrana ondulante sobre el fluido que ella desplaza en dirección del eje x es:

$$f = (\Sigma \rho QV)_{sal} - (\Sigma \rho QV)_{en} \quad (2)$$

(los subíndices *sal* y *en* se refieren a los flujos salientes y entrantes a través de la superficie de control considerada)

Es decir:

$$f = \rho Q (-V_0) - \rho Q (-V_b) = -\rho Q (V_0 - V_b) \quad (3)$$

Y por el principio de acción-reacción, la fuerza ejercida por el fluido sobre la membrana, en definitiva, la fuerza propulsora ejercida sobre el cuerpo que se se desplaza a la velocidad V_b es:

$$F_p = -f = \rho Q (V_0 - V_b) : \text{Fuerza de propulsión de la superficie ondulante} \quad (4)$$

Y la potencia propulsiva efectiva es por tanto:

$$P_p = F_p V_b = P_p = \rho Q (V_0 - V_b) V_b \quad (5)$$

La potencia que debe entregar el motor propulsor, o potencia consumida P_c (despreciando, además de las fuerzas viscosas, la energía consumida en la formación de olas en la superficie libre si éstas llegan a producirse, aunque en este caso no se considerarán en principio ya que la aleta o membrana se supone sumergida) ha de suministrar también la energía cinética que arrastra el fluido que abandona la la superficie de ccontrol por unidad de tiempo, cuya velocidad, en valor absoluto, es como ya se indicó:

$$V_0 - V_b$$

Por lo que la energía cinética del fluido que abandona la superficie de control por unidad de tiempo es:

$$E_c = 1/2 \rho Q (V_0 - V_b)^2 \quad (6)$$

Por lo tanto la potencia consumida es:

$$P_c = P_p + E_c = \rho Q (V_0 - V_b) V_b + 1/2 \rho Q (V_0 - V_b)^2 \quad (7)$$

Y el rendimiento propulsivo es:

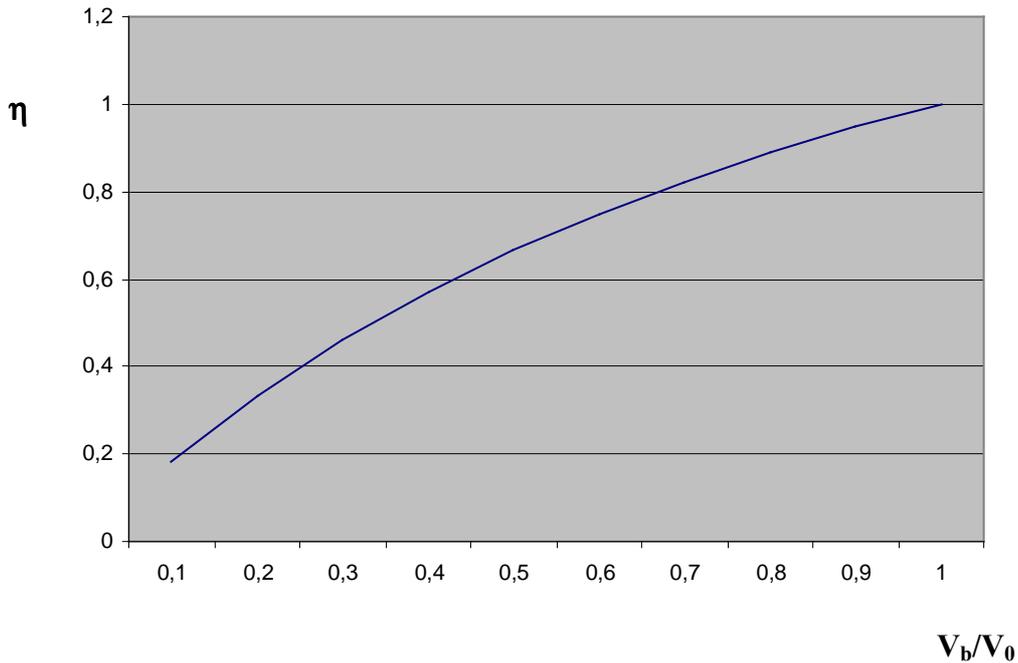
$$\eta = P_p / (P_p + E_c)$$

$$\text{resultando así: } \eta = 2 V_b / (V_0 + V_b) = \frac{2}{1 + \frac{V_0}{V_b}} \quad (8)$$

Representando η en función de V_b/V_0 , se deduce que a medida que aumenta la velocidad del barco el rendimiento propulsivo aumenta. En el momento en que la velocidad de avance del barco (V_b) se hace igual a la velocidad relativa de salida de fluido propulsado (V_0), dicho rendimiento se hace máximo ($\eta=1$), lo cual es lógico ya que el fluido quedaría en reposo detrás del mismo ($V_{abs} = V_0 - V_b = 0$)

2. OBJETIVOS

Fig. 18 Curva que resulta de representar η frente a V_b/V_0



– **Caso particular 1. Ensayo de tracción a punto fijo: $V_b=0$**

$$\eta=0 \quad (\text{el rendimiento es nulo})$$

$$F_p = -\rho Q (V_o - 0) = \rho 2ab \lambda v \lambda v = \rho 2ab \lambda^2 v^2 = K \cdot v^2 \quad (9)$$

(La fuerza ejercida por el propulsor sería proporcional al cuadrado de la frecuencia)

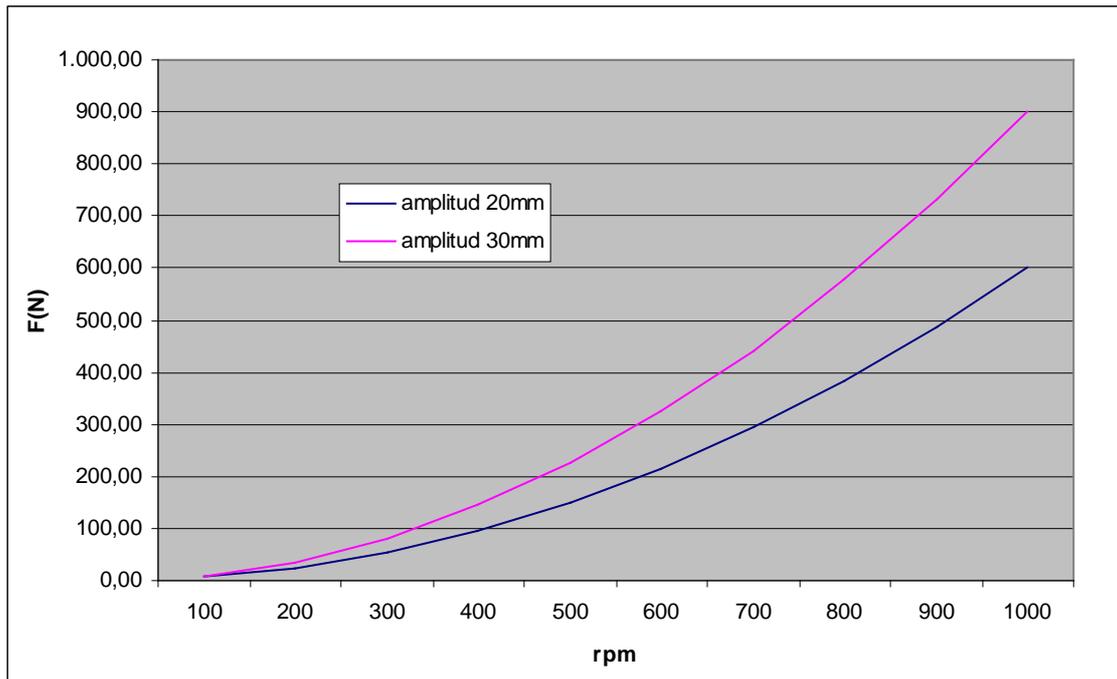
– **Caso particular 2. La velocidad de avance del buque es igual a la velocidad relativa de salida del fluido respecto a dicho cuerpo: $V_o = V_b$**

$$\eta = 2 V_b / (V_o + V_b) = 1 \quad (\text{el rendimiento es máximo, ya que toda la potencia se emplearía en propulsar el buque puesto que el fluido quedaría en reposo. Detrás: } V_{\text{abs salida}} = V_b - V_o = 0)$$

$$F_p = -\rho Q (V_o - V_b) = 0 \quad (10)$$

(la fuerza de propulsión de la superficie ondulante es nula)

Fig. 19 Curva teórica de respuesta (ensayo de tracción a punto fijo)



La formulación anteriormente enunciada lo es sobre hipótesis ideales de ausencia de rozamiento y de que el caudal generado por la impulsión del fluido esté confinado en un conducto de sección rectangular de las dimensiones antes indicadas de $2a \times b$

2.2. Objetivos de esta tesis

El análisis y resultados obtenidos hasta este punto son puramente teóricos, han sido obtenidos sin considerar las fuerzas de rozamiento viscoso ni la energía invertida en la formación de olas, suponiendo además que el caudal de fluido impulsado por la superficie ondulante queda confinado dentro de un canal rectangular de dimensiones $2a \times b$

La superficie ondulante, aproximadamente sinusoidal, será creada mediante una membrana de material flexible que, a fin de generar la onda en forma de senoide, tiene que ir estirando y encogiéndose por segmentos, lo cual crea dificultades de deterioro del material y pérdidas de rendimiento debido a la energía invertida en deformar la aleta.

Por todo ello se decidió acometer la reproducción de un sistema de propulsión próximo al anguiliforme por medio de un modelo formado por segmentos rígidos articulados entre sí de tal manera que el efecto sea similar al de una superficie ondulante, y realizar el análisis de las fuerzas de propulsión generadas por medio de CFD, teniendo en cuenta además la viscosidad del fluido.

2. OBJETIVOS

Los objetivos concretos de este trabajo de investigación son:

- 1) Diseñar un mecanismo capaz de generar una superficie ondulante para propulsión en medio marino.
- 2) Construir un mecanismo propulsor experimental.
- 3) Obtener, mediante ensayo de tracción a punto fijo la curva de respuesta de la superficie propulsora para distintos regimenes de frecuencia.
- 4) Crear un modelo CFD bidimensional de la superficie propulsora propuesta, en el intervalo $2 \times 10^6 < Re < 5 \times 10^6$, tomando como $Re = \frac{\rho v \lambda^2}{\mu}$, donde
 - μ : viscosidad dinámica del fluido
 - ρ : densidad del fluido
 - λ : longitud de onda de la membrana o aleta
 - v : frecuencia de ondulación de la misma.
- 5) Obtener, mediante postprocesado de los datos obtenidos, la curva de respuesta de la superficie propulsora para distintos regimenes de frecuencia.
- 6) Obtener, mediante postprocesado de los datos obtenidos, la curva de respuesta de la superficie propulsora para distintos regimenes de amplitud de la onda.
- 7) Cuantificar las fuerzas de empuje y resistencia viscosa que actúan sobre la superficie propulsora

Para investigar mejor el flujo en torno al movimiento de esta superficie ondulante se requiere un amplio conjunto de datos. En este trabajo se aplicará a este problema una aproximación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando un código comercial conocido (ANSYS FLUENT 6.3.26). Este enfoque CFD va a aportar un conjunto de datos completo y complejo que permitirá una investigación detallada del comportamiento propulsor de la superficie ondulante propuesta.

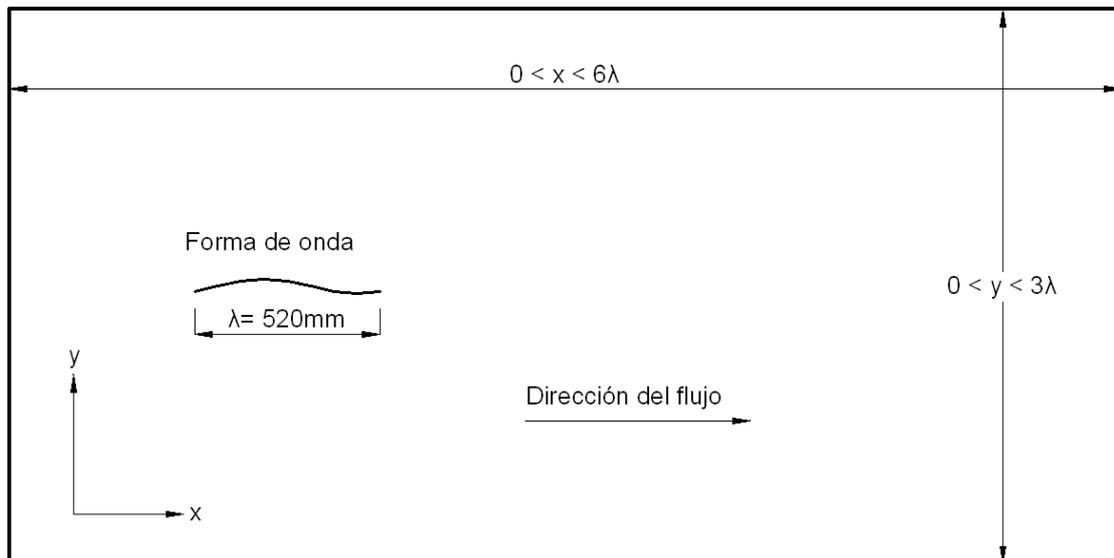
3. ENSAYO CFD

3.1. Elaboración de la geometría

El presente capítulo describe dos filosofías distintas de creación del dominio computacional simplificado (2D): a) onda modelizada mediante una serie de segmentos rígidos; b) onda modelizada de modo continuo. Como herramienta ha sido empleado el programa GAMBIT 2.4.6, capaz de elaborar geometrías y mallados.

El volumen de control se prolongó en una longitud igual a seis veces la longitud de la onda (en la dirección del flujo) con objeto de capturar la formación de la estela. La forma de onda fue simplificada aproximándola, en el caso a) por una serie de segmentos rígidos esbeltos, en el caso b) mediante una simple línea continua.

Fig. 20. Imagen esquemática del volumen de control (2D) empleado para elaborar el modelo CFD



La elección de un mallado adecuado es fundamental a la hora de obtener una solución lo más exacta posible y, sobre todo, en términos de ahorro de tiempo, ya que no sólo interesa el tiempo que se invierte en la construcción del mallado, sino también el tiempo necesario para realizar el cálculo, que también depende del tipo de mallado que se seleccione.

En este caso se decidió el empleo de un *mallado no estructurado* por su facilidad de adaptación a la geometría de la onda, de aproximadamente 30.000 elementos triangulares recubriendo todo el dominio. En todos los casos el mallado ha sido realizado con una mayor concentración de celdas en el entorno próximo a la onda y en la zona de la estela buscando una mayor precisión del cálculo en dichas zonas. A medida que la posición de las celdas se va alejando de dichas zonas el tamaño de éstas, progresivamente, va en aumento.

3. ENSAYO CFD

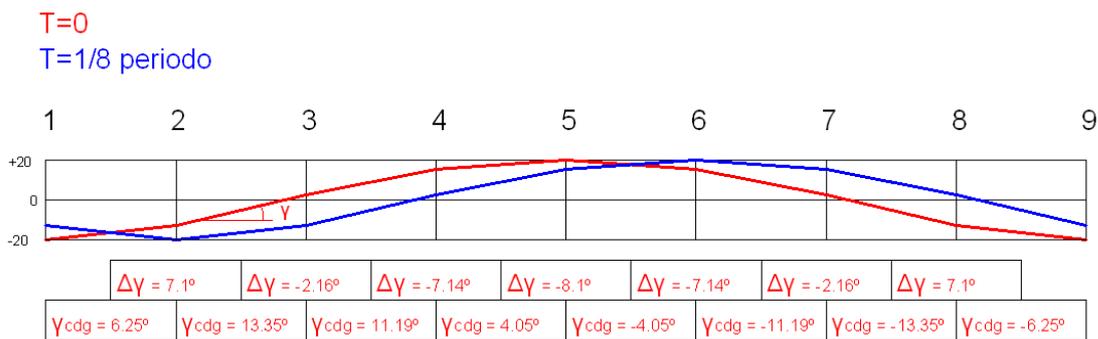
Una vez que la geometría está definida (fig. 20), se efectúa un mallado (de control) de los ejes que definen el contorno de la forma de onda y de los ejes que confinan el volumen de control mediante el interface de GAMBIT *spacing and grading parameters*.

A partir del mallado de dichos ejes y aplicando una *size function* (especificando los parámetros: *start size, growth rate, size limit*) en el mallado de la geometría (*face meshing*) se controla el ratio de crecimiento de las celdas a medida que éstas se van alejando de la forma de onda.

3.1.1. Forma de onda modelizada a partir de ocho segmentos rígidos (Figs. 21, 22)

En este modelo se establece como fija la longitud de cada segmento de membrana y por ello tanto la longitud de la separación entre articulaciones como la de la forma de onda dejan de permanecer fijas.

Fig. 21. Geometría de la forma de onda aproximada por 8 segmentos



Coordenadas de CDG a incluir, para cada zona móvil, en el formulario "DYNAMIC MESH ZONES"

Caso 1: LONGITUD DE SEGMENTO (X) = 65 mm. LONGITUD DE ONDA (λ) = 512.914 mm								
Xcdg = 0	Xcdg = 64.61	Xcdg = 127.85	Xcdg = 191.62	Xcdg = 256.45	Xcdg = 321.29	Xcdg = 385.05	Xcdg = 448.30	Xcdg = 512.91
Ycdg = 0	Ycdg = 7.07	Ycdg = 22.08	Ycdg = 34.69	Ycdg = 39.28	Ycdg = 34.69	Ycdg = 22.08	Ycdg = 7.07	Ycdg = 0

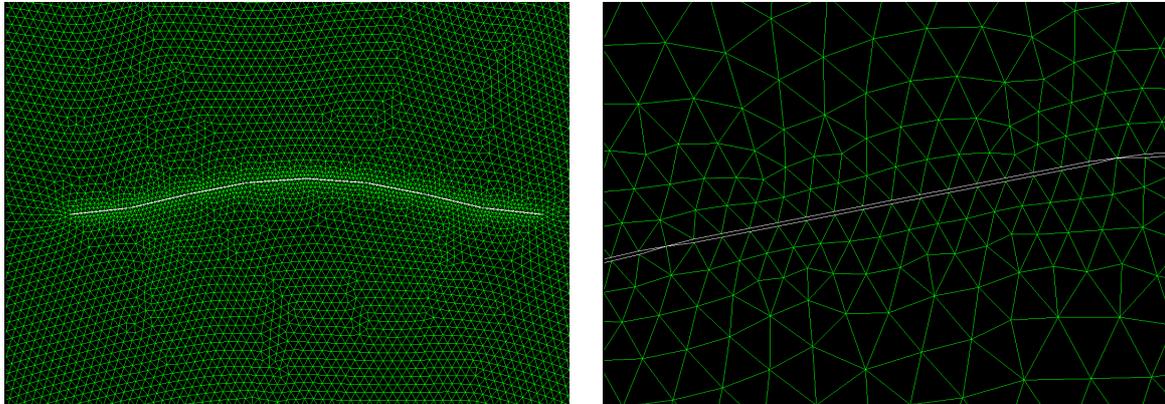
Caso 2: LONGITUD DE SEGMENTO (X) = 66 mm. LONGITUD DE ONDA (λ) = 520.478 mm								
Xcdg = 0	Xcdg = 65.60	Xcdg = 129.82	Xcdg = 194.40	Xcdg = 260.23	Xcdg = 326.07	Xcdg = 390.65	Xcdg = 454.87	Xcdg = 520.47
Ycdg = 0	Ycdg = 7.18	Ycdg = 22.42	Ycdg = 35.23	Ycdg = 39.89	Ycdg = 35.23	Ycdg = 22.42	Ycdg = 7.18	Ycdg = 0

Inicialmente se construyó una geometría constituida por ocho segmentos rígidos, de forma esbelta y acabados en "punta de aguja", con el objeto de que no colisionasen entre sí sus contornos durante el movimiento.

Fue necesario hacer coincidir la longitud del tramo oblicuo de la punta del segmento con el tamaño de celda en el mallado del eje correspondiente a dicha zona. De este modo, al proceder al mallado del dominio se evita que se solapen las celdas con la geometría del

perfil de forma de onda (dando lugar a celdas que el programa FLUENT interpreta como volúmenes negativos)

Fig. 22. Detalle del mallado



(a). Vista general

(b). Detalle del mallado de control (equidistante) y de las puntas del segmento.

El movimiento de cada uno de estos segmentos se gobierna por una función definida por usuario (UDF) tipo DEFINE CG MOTION (En APENDICE 1 se incluyen las UDF's, programadas en lenguaje C, para los segmentos 1° a 8°). Con cada cambio de posición de la forma de onda (tras cada *time step*) el programa FLUENT debe recalcular la posición de todas las celdas del dominio mediante un esquema de mallado dinámico conocido como *Local Remeshing*: en cada *time step* las celdas próximas a la forma de onda son chequeadas con el fin de garantizar que se encuentran dentro de los límites máximo y mínimo de tamaño de celda así como por debajo del máximo valor de *skewness*. Las celdas que no cumplen con esos criterios son fundidas y remalladas según valores admisibles de tamaño y *skewness*.

Tras simular el movimiento de la forma de onda se observó que este procedimiento de cálculo resultaba ser excesivamente lento, por tanto se decidió cambiar de estrategia y buscar un método en el cual dicho movimiento consumiera menos recursos de computación, tal como se propone a continuación, considerando una membrana continua que forme la onda.

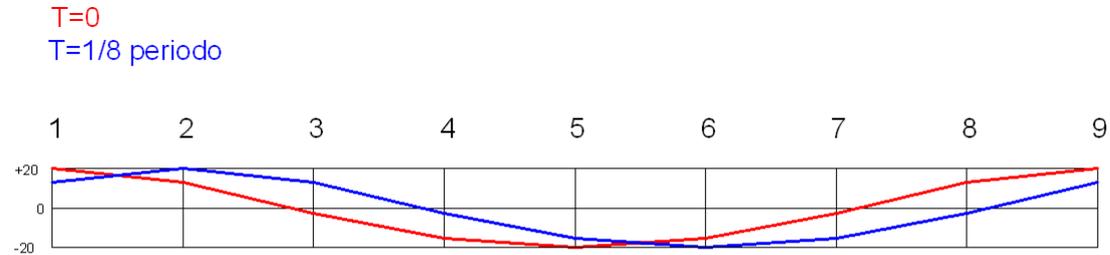
3.1.2. Forma de onda modelizada de modo continuo (Figs. 23, 24)

Con el fin de obtener mayor velocidad en la simulación se decidió aproximar la forma de onda por medio de una línea continua, (en este modelo sí se mantienen fijas tanto la separación entre articulaciones como la entera longitud de la onda) y gobernar con mayor flexibilidad el movimiento de los nodos de la malla mediante una UDF tipo DEFINE

3. ENSAYO CFD

GRID MOTION (En APENDICE 2 se incluye la UDF que gobierna el movimiento de este mallado).

Fig. 23. Geometría de la forma de onda modelizada de modo continuo



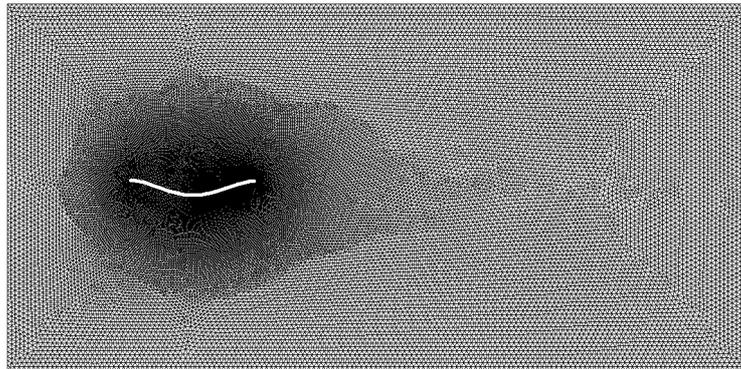
Coordenadas de las articulaciones de los segmentos de onda en el instante t=0

DISTANCIA ENTRE CORREDERAS (X) = 65 mm. LONGITUD DE ONDA (λ) = 520 mm

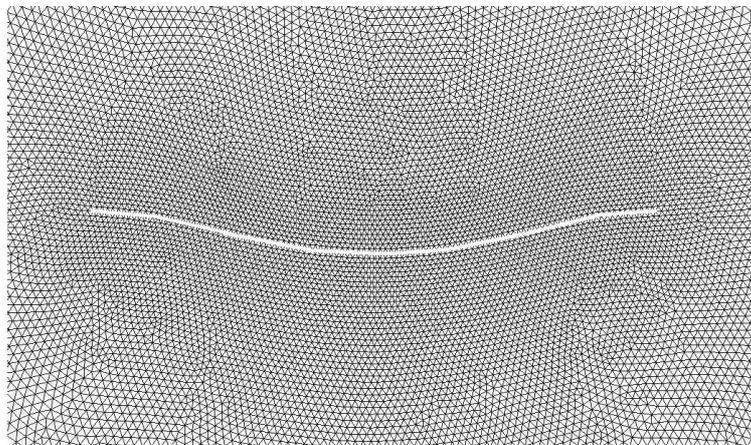
X ₁ = 0	X ₂ = 65	X ₃ = 130	X ₄ = 195	X ₅ = 260	X ₆ = 325	X ₇ = 390	X ₈ = 455	X ₉ = 520
Y ₁ = 0	Y ₂ = - 7.11	Y ₃ = - 22.54	Y ₄ = - 35.40	Y ₅ = - 40	Y ₆ = - 35.40	Y ₇ = - 22.54	Y ₈ = - 7.11	Y ₉ = 0

En este caso, igualmente, se aumenta la concentración del mallado en la zona próxima a la superficie de impulsión y en la zona de la estela. Asimismo, se emplea también un esquema de mallado dinámico tipo *Local Remeshing*

Fig. 24. Detalle del mallado



(a) Malla Computacional finalmente empleada



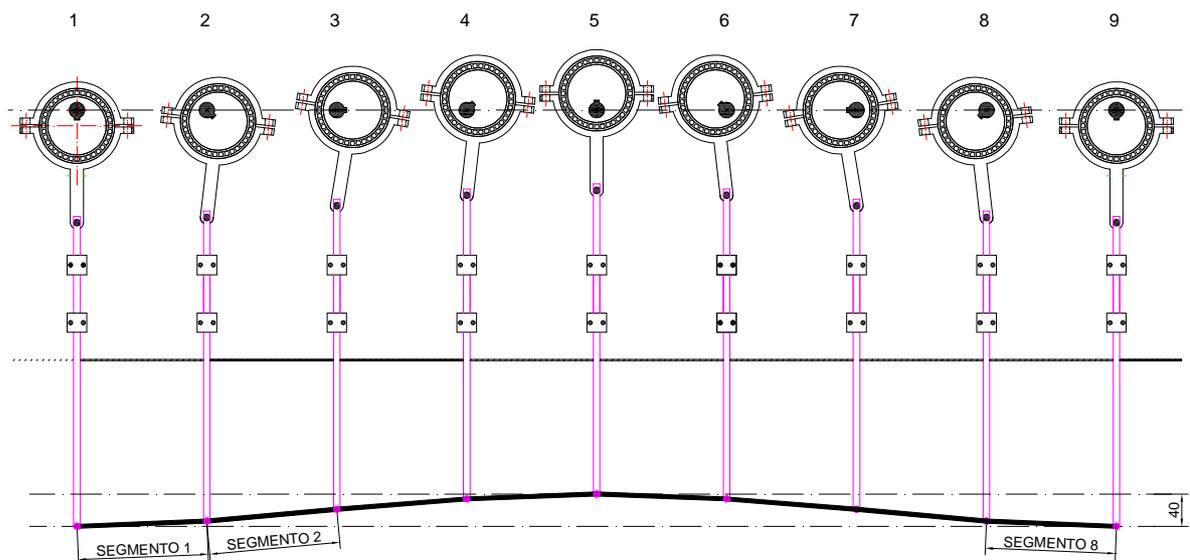
(b) Detalle de la zona cercana a la aleta

3.2. Deformación del mallado gobernada por UDF

La forma discreta de onda es accionada por un eje con 9 excéntricas, situadas éstas equidistantes entre sí, a una distancia de 65 mm, y con un desfase de $\pi/4$ entre posiciones contiguas. Dichas excéntricas a su vez gobiernan otras tantas correderas.

Todas las correderas tienen unas leyes de movimiento perfectamente conocidas, de tal forma que describen su posición en función del ángulo de rotación del eje de excéntricas (d_1 : ecuación 33 del capítulo Estudio Cinemático del Mecanismo, d_2 : ecuación 35) Derivando estas expresiones con respecto al tiempo se obtienen las expresiones que describen la velocidad de las correderas en función del ángulo de rotación del eje de excéntricas y de su velocidad angular (d'_1 : ecuación 45 del capítulo Estudio Cinemático del Mecanismo)

Fig. 25 Esquema de accionamiento de la onda



3.2.1. Modelización del movimiento de la forma de onda constituida por 8 segmentos rígidos articulados entre sí (caso a)

Segmento 1. Actuado por las excéntricas 1 y 2

- Es conocida la velocidad lineal vertical de la arista izquierda del Segmento 1, dado que se corresponde con la velocidad de la corredera 1, asociada a la excéntrica 1.

3. ENSAYO CFD

$$d_1' = -a\omega \sin \theta_{21} + b \left[(a \cos \theta_{21} / b \cos \theta_{31}) \omega \right] \sin \theta_{31} \quad (11)$$

donde

- $\omega = \theta'_{21} = \theta'_{22} = \dots = \theta'_{29}$: velocidad angular del eje de excéntricas
- θ_{21} : ángulo de rotación de la excéntrica 1
- $\theta_{31} = -\arcsin((a/b) \sin \theta_{21}) + \pi$ (34) (ángulo de posición de la biela asociada a la excéntrica 1)

Es conocida la velocidad angular (γ'_{12}) del segmento 1, puesto que se puede obtener a partir de las expresiones de la posición de las correderas 1 y 2, que son las que lo accionan, (ecs. 11 y 25 del capítulo Estudio Cinemático del Mecanismo)

$$\gamma'_{12} = \frac{-\left(\frac{a}{q}\right)\omega \sin \theta_{21} + \left(\frac{b}{q}\right)\sin \theta_{31}\theta'_{31} + \left(\frac{a}{q}\right)\omega \sin \theta_{22} - \left(\frac{b}{q}\right)\sin \theta_{32}\theta'_{32}}{1 + \left(\frac{(a \cos \theta_{21} - b \cos \theta_{31}) - (a \cos \theta_{22} - b \cos \theta_{32})}{q}\right)^2} \quad (51)$$

donde

- θ'_{31} : velocidad angular de la biela asociada a la excéntrica 1
 - $\theta_{22} = \theta_{21} + \pi/4$ (ángulo de rotación de la excéntrica 2)
 - θ_{32} : ángulo de posición de la biela asociada a la excéntrica 2
 - θ'_{32} : velocidad angular de la biela asociada a la excéntrica 2
 - $q = 65 \text{ mm}$ (distancia entre dos excéntricas consecutivas)
- o A partir de aquí es posible construir una Función Definida por Usuario (UDF) en lenguaje C, empleando la macro DEFINE_CG_MOTION (de argumentos name,dt,vel,omega,time,dtime), que defina el movimiento del sólido rígido: segmento 1, de tal manera que ésta sea inteligible por el

código del software FLUENT (ver APÉNDICE1) Para ello es necesario la inclusión en dicha función de:

- las expresiones de las componentes (x é y) de la velocidad lineal de un punto conocido del segmento 1 (arista izquierda)
 - la expresión de la velocidad angular (z) de dicho sólido rígido
- Dicha UDF constituye un fichero fuente que se compila mediante el software Microsoft VISUAL C++: se introduce en el panel *Compiled UDFs* del interface de FLUENT (*Add*), se construye la librería (*Build*) y se carga ésta (*Load*)

Segmento 2. Actuado por las excéntricas 2 y 3

- Es conocida la velocidad de su extremo izquierdo (\overline{d}_2')

$$\text{dado que } \overline{d}_2' = \overline{d}_1' + \overline{\gamma}_{12}' \wedge \overline{X} \quad (12)$$

Donde \overline{X} es el vector que coincide con SEGMENTO 1

- Es conocida su velocidad angular (γ'_{23}), puesto que se puede obtener a partir de las expresiones de la posición de las correderas que lo accionan, (ec. 51 del capítulo Estudio Cinemático del Mecanismo)
- Igual que en el caso anterior, se construye la UDF que gobierna el movimiento del contorno móvil del volumen de computación correspondiente al SEGMENTO 2. Se introduce en FLUENT. Se compila y se asocia a la zona cuyo movimiento se desea gobernar (ver APÉNDICE 1)

– Resto de segmentos

- Del mismo modo que en el Segmento 2, se determina la velocidad de la arista de ataque (leading edge) del segmento i a partir de:
- la velocidad (conocida) de la arista de ataque del segmento anterior ($i-1$)
 - de la velocidad angular del segmento ($i-1$)

3. ENSAYO CFD

- del vector que coincide con dicho segmento ($i-1$)
- Es conocida su velocidad angular (γ_{ij}'), puesto que se puede obtener a partir de las expresiones de la posición de las correderas que lo accionan, (ec. 51 del capítulo Estudio Cinemático del Mecanismo)
- Igual que en el resto de los casos, se construye la UDF que gobierna el movimiento del contorno móvil del volumen de computación correspondiente al SEGMENTO i . Se introduce en el interface de FLUENT. Se compila y se asocia a la zona cuyo movimiento se desea gobernar

3.2.2. Modelización del movimiento de la forma de onda conformada de modo continuo (caso b)

Se emplean dos *walls* (impuesto por FLUENT) para modelizar la forma de onda. Se construyó una Función Definida por Usuario (UDF) tipo DEFINE_GRID_MOTION, escrita en C++ y compilada empleando Microsoft VISUAL C++ 6.0. de un modo similar al caso anterior (ver APÉNDICE 2)

Esta UDF sitúa cada nodo del mallado en una localización según modelo cinemático descrito en el correspondiente capítulo de la presente tesis.

La ubicación de cada nodo se establece en la UDF por medio de los comandos $NODE_X(v) =$ and $NODE_Y(v) =$, donde v es el nodo en cuestión. La UDF recorre todas las caras y celdas para detectar si la posición del nodo debe ser actualizada.

- Es conocida la ubicación, en función del tiempo, de los puntos de la forma de onda continua que coinciden con las deslizaderas (en posiciones: $x_0=0$, $x_1=0.065$, $x_2=0.130$,....., $x_8=0.520$)
- La posición de los puntos intermedios, p.ej. entre x_0 y x_1 , se interpola linealmente a partir de la posición conocida de dichos puntos. Por tanto el movimiento del tramo de forma de onda continua comprendido entre dos deslizaderas se asemeja al de un sólido rígido lineal de forma recta.
- Por medio del panel *Dynamic Mesh Zones* se seleccionan las zonas dinámicas: se identifica, tanto la zona móvil como su *shadow*, como *User-Defined* y se asocian dichas zonas con la correspondiente UDF compilada.

3.2.3. Esquema empleado de mallado dinámico

Tras cada *Time Step* el código comercial FLUENT calcula automáticamente las posiciones de los nodos internos del mallado basándose en:

1. las Funciones Definidas por Usuario que gobiernan el movimiento de las zonas móviles
2. el tipo de celda empleado
3. el esquema de mallado dinámico elegido.

El programa incorpora diversos esquemas de mallado dinámico, éstos pueden ser usados individualmente o bien se puede emplear una combinación de ellos:

- ***Spring Smoothing*** (Análogo a un sistema de muelles): los nodos de la malla se mueven como si estuviesen conectados entre sí por medio de muelles.
- ***Local Remeshing***: En los puntos donde las celdas cuyos valores límite de tamaño o skewness son excedidos, se añaden o se borran celdas, de tal manera que localmente se retorne a valores admisibles.
- ***Layering***: capas de celdas son añadidas o borradas a medida que la zona crece o se encoge. Este modelo es adecuado para un movimiento del fluido de un modo rectilíneo y paralelo a la malla.

Los valores asignados a los parámetros que conforman el esquema de mallado dinámico empleado en los ensayos de la presente tesis han sido obtenidos mediante asesoramiento por parte del servicio técnico de ANSYS, consulta en foros (<http://www.cfd-online.com>) y trabajando a base de prueba y error.

3. ENSAYO CFD

3.3. Simulaciones flujo turbulento

Ha sido calculado el número de Reynolds empleando como longitud característica la longitud de onda de la aleta (λ) y como velocidad característica la velocidad de avance de la onda, definida en el apdo. 2.1 ($V_0 = v \lambda$)

$$\text{Re} = \frac{\rho V_0 \lambda}{\mu} = \frac{\rho v \lambda^2}{\mu}$$

Se ha tomado como valor de la longitud característica el valor de λ , por asimilación a la empleada para los ensayos realizados con perfiles hidrodinámicos, para los cuales la longitud característica es la dimensión de la cuerda.

En el caso de la aleta, tomando como longitud característica λ , los ensayos realizados a distintos regímenes de revoluciones corresponden a números de Reynolds en el intervalo entre 2×10^6 y 5×10^6 , el cual para los ensayos con los citados perfiles hidrodinámicos parece corresponder a la zona de transición entre régimen laminar y turbulento, ya que a pesar de haber sido revisada gran cantidad de bibliografía, no ha sido encontrado un criterio que se imponga a los demás en cuanto al número de Reynolds crítico que establezca de una forma nítida el cambio de régimen laminar a turbulento. Es por ello que se ha optado por la realización de simulaciones CFD en ambos regímenes, laminar y turbulento, como se verá a continuación. Pero es más: si bien en el caso de régimen laminar, la rugosidad de la superficie de la membrana no se considera, en el caso del régimen turbulento sí debe ser tomada en cuenta. Es por ello que se optó también por realizar simulaciones para diferentes valores de la rugosidad de la superficie del material que forma la aleta a fin de analizar las repercusiones de la misma.

3.3.1. Modelo numérico bidimensional

3.3.1.1. Ecuaciones gobernantes

El movimiento del fluido es regido por la ecuación de conservación de masa y la de conservación de cantidad de movimiento o ecuaciones de Navier-Stokes. El flujo turbulento se caracteriza por campos de velocidades fluctuantes que se producen en una escala tan pequeña que su simulación requeriría muchísimo coste computacional para los ordenadores actuales. Por este motivo, en lugar de resolverse las ecuaciones exactas de Navier-Stokes, para la mayoría de aplicaciones en ingeniería lo que se hace es

descomponer las magnitudes en una componente promedio y una fluctuante, resultando un conjunto de ecuaciones modificadas que requieren un coste computacional menor. Éstas se conocen como RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), que en forma cartesiana y para un modelo bidimensional, flujo incompresible, vienen dadas por las ecuaciones (13), (14) y (15).

$$\operatorname{div}(V) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \operatorname{div}(\rho v_x V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}(v_x)) - \operatorname{div}(\rho \overline{v'_x V'}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_y) + \operatorname{div}(\rho v_y V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}(v_y)) - \operatorname{div}(\rho \overline{v'_y V'}) + g \quad (15)$$

Estas ecuaciones RANS tienen la misma forma que las de Navier-Stokes exactas, diferenciándose en que:

- v_x , v_y representan las componentes del vector velocidad V sobre los ejes x e y respectivamente (la velocidad V , densidad ρ , viscosidad μ representan los valores promedio)
- v'_x , v'_y representan las componentes del vector velocidad V' sobre los ejes x e y (la velocidad V' es una componente fluctuante representante del régimen turbulento)
- El efecto de turbulencia se incluye en el modelo matemático mediante un término adicional presente en las ecuaciones (14) y (15):

$$-\operatorname{div}(\rho \overline{v'_x V'}) = \frac{\partial (-\rho \overline{v'^2_x})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'_x v'_y})}{\partial y}$$

$$-\operatorname{div}(\rho \overline{v'_y V'}) = \frac{\partial (-\rho \overline{v'_x v'_y})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'^2_y})}{\partial y}$$

Un abordaje muy empleado es utilizar la hipótesis de Boussinesq, la cual relaciona las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad mediante la ecuación (16).

$$\tau_{xy} = -\rho \overline{v'_x v'_y} = \mu_t \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{xy} \quad (16)$$

siendo:

3. ENSAYO CFD

- δ_{ij} la delta de Kronecker ($\delta_{ij}=1$ si $i=j$ y $\delta_{ij}=0$ si $i \neq j$) que se incluye para hacer la fórmula aplicable a las tensiones normales de Reynolds para $i=j$ (Versteeg y Malalasekera, 2007).
- k la energía cinética turbulenta por unidad de masa: $k = \frac{1}{2}(\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2})$
- μ_t , término de la ecuación (3), la viscosidad turbulenta, la cual se ha determinado mediante el modelo k- ϵ .

El k- ϵ estándar es un modelo semi-empírico que añade dos ecuaciones de transporte adicionales, una de ellas para calcular la energía cinética turbulenta, k , y la otra para calcular su disipación, ϵ , ecuaciones (17) y (18) respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho k V) = \text{div} \left[\frac{\mu_k}{\sigma_k} \text{grad}(k) \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \text{div}(\rho \epsilon V) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_k}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (18)$$

En las ecuaciones anteriores, G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes medios de velocidad y viene dada por la ecuación (19):

$$G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (19)$$

La viscosidad turbulenta, μ_t , se calcula combinando k y ϵ según la ecuación (19):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (20)$$

C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k y σ_ϵ son constantes cuyo valor en este trabajo se ha tomado como el valor estándar por defecto, $C_\mu = 0.09$; $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\epsilon = 1.3$ para el fluido elegido para el modelo, que es agua líquida a 25°.

A pesar de que ningún modelo de turbulencia es perfecto, el modelo k- ϵ tiene la ventaja de ser robusto, computacionalmente económico y lo suficientemente preciso para un amplio rango de flujos turbulentos, siendo ampliamente utilizado en aplicaciones prácticas de la ingeniería. Por este motivo, se ha elegido este modelo en el presenta trabajo.

3.3.1.2. Parámetros de cálculo del modelo transitorio

Para resolver las ecuaciones gobernantes se acudió al software comercial ANSYS FLUENT 6.3, el cual se basa en el método de volúmenes finitos (FVM).

Con el fin de simplificar el modelo CFD, fueron hechas las siguientes hipótesis:

3.3.1.2.1. Definición de material

Se selecciona flujo newtoniano e incompresible: *water-liquid* con propiedades constantes a 25° :

- Densidad (ρ)= 998,20 kg/m³
- Viscosidad dinámica (μ)=: 0,001003 kg/m-s

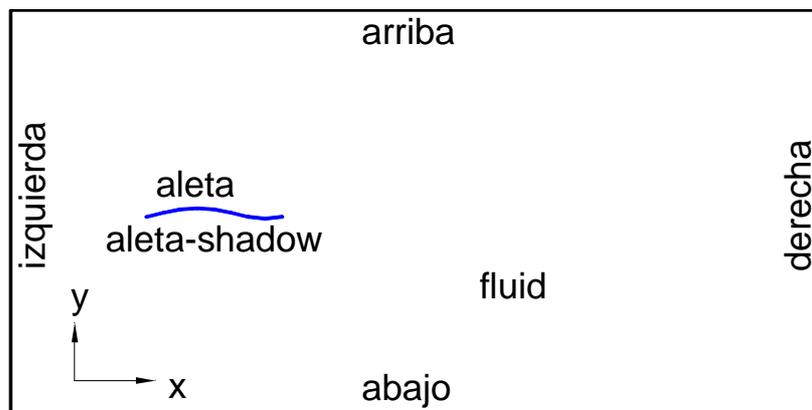
3.3.1.2.2. Definición de las condiciones de operación

El programa trabaja con valores de presiones manométricas con relación a la presión atmosférica, la cual se toma como un valor de 101.325 Pascal

- a) Se establece como *Operational Pressure (Pascal)* = 101.325
- b) *Reference Pressure location*: Y(m) = 0,78 (se establece la ubicación (altura) del punto geométrico, superficie del líquido, en el cual la presión es el antes mencionado valor de 101325 Pa)
- c) *Gravitational Acceleration*: Y(m/s²) = -9.81

3.3.1.2.3. Definición de condiciones de contorno

Fig. 26 Boundary Conditions



Se ha efectuado la simplificación de considerar la aleta bastante alejada de la influencia de la superficie libre de agua. Asimismo, se ha considerado que no habrá

3. ENSAYO CFD

flujos de fluido a través de las superficies de control *arriba* y *abajo* (dichas superficies de control han sido alejadas de la onda propulsora). Por tanto ambas superficies han sido modelizadas como pared con deslizamiento (*slip wall*)

Con objeto de tener en cuenta el efecto de las fuerzas viscosas que el fluido ejerce sobre la aleta, se modelizó esta como pared sin deslizamiento (*no slip wall*).

En todas las simulaciones llevadas a cabo se han establecido las siguientes condiciones de contorno:

zone	Type
<i>arriba</i>	<i>slip wall</i>
<i>abajo</i>	<i>slip wall</i>
<i>aleta</i>	<i>no slip wall</i>
<i>Aleta-shadow</i>	<i>no slip wall</i>

Las condiciones de contorno especificadas para las zonas *izquierda* y *derecha* se indicarán en los respectivos capítulos de postproceso

3.3.1.2.4. Definición de movimiento de la malla

Según se indica en capítulo 3.2

3.3.1.2.5. Habilitación de modo de cálculo

- a) Se selecciona un modelo 2D
- b) Se selecciona un Solver tipo *Pressure Based*
- c) Se selecciona un modelo de cálculo dependiente del tiempo (*Unsteady*), puesto que la geometría del dominio computacional varía en función del tiempo.
- d) Se mantiene la selección por defecto de *1st-Order Implicit* en el cuadro *Unsteady Formulation* (imprescindible en simulaciones con mallado dinámico)

3.3.1.2.6. Definición de modelo de turbulencia

- a) Se selecciona un modelo k- ϵ
- b) Se introducen los valores de los parámetros del modelo de turbulencia indicados en el cap 3.3.1.1.

3.3.1.2.7. Definición de parámetros de resolución de las ecuaciones de gobierno

- a) Se empleó el algoritmo *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)* para la relación presión-velocidad
- b) Se utilizó un esquema de primer orden debido a que suele dar mejor resultado para simulaciones con mallas dinámicas. En cuanto a derivadas temporales se acudió a un método implícito.

3.3.1.2.8. Definición de *Time Step* e inicio del cálculo

- a) Para definir el paso de tiempo (*Time Step*), se dividió el periodo de oscilación de la membrana (T) en 100 partes, es decir, el paso de tiempo se ha tomado como $\Delta t = T/100$. Tanto la elección de la malla como del paso de tiempo fueron chequeados estimando la sensibilidad de las simulaciones ante variaciones de los mismos, de modo que incrementos de tamaño de malla y de paso de tiempo no varían los resultados.
- b) Se ha definido un *Number of Time Steps* de tal manera que el programa efectúe el cálculo para treinta ciclos (son los cálculos efectuados en el ciclo n° 30, en el cual ya ha sido alcanzado un régimen estacionario, los que se emplean para realizar el postproceso). Por tanto en cada experimento con el modelo CFD el programa ha obtenido una solución (campos de velocidades y de presiones) para cada *Time Step* y ha generado un archivo en el cual ha almacenado dichos datos. Al cabo de cada ensayo (48 h de computación) han sido generados 3000 archivos *.dat, de los cuales en el presente trabajo se tienen en cuenta los últimos 100 para realizar el análisis post proceso
- c) Mediante la asignación de un valor adecuado al parámetro *Max Iterations per Time Step* es posible asegurarse de que la solución converge en cada *Time Step* con la precisión requerida.

3. ENSAYO CFD

3.3.2. Postproceso

Con el fin de alcanzar el estado estacionario con suficiente precisión, ha sido necesario tener en cuenta un determinado tiempo previo, tal como se indicó antes. Después de varias simulaciones se ha verificado que, tras aproximadamente veinte períodos, el tiempo es suficientemente largo para alcanzar el estado estacionario. Por esta razón, todos los resultados dados en el presente trabajo corresponden al período de tiempo 30° desde el inicio de cada ensayo.

3.3.2.1. Ecuaciones de cálculo de fuerzas hidrodinámicas

A medida que la aleta realiza su movimiento ondulatorio sumergida en el agua, se produce una fuerza en las direcciones x e y. Las componentes de la fuerza que actúan sobre el cuerpo: F_x y F_y , pueden ser evaluadas mediante la integración de la proyección de las fuerzas de presión y la viscosa según las direcciones x e y respectivamente.

La componente de empuje total a lo largo del eje x se calcula sumando la componente de presión y de fuerzas viscosas, ecuación (21):

$$F_x = F_{px} + F_{vx} \quad (21)$$

donde F_{px} es la fuerza de presión en el eje x y F_{vx} es la fuerza viscosa en el eje x.

La fuerza de presión a lo largo del eje x viene dada por:

$$F_{px} = - \int_A p n_x dA \quad (22)$$

donde n_x es la componente en x del vector unidad normal en dA

La fuerza viscosa a lo largo del eje x viene dada por:

$$F_{vx} = \int_A \tau_{ij} n_x dA \quad (23)$$

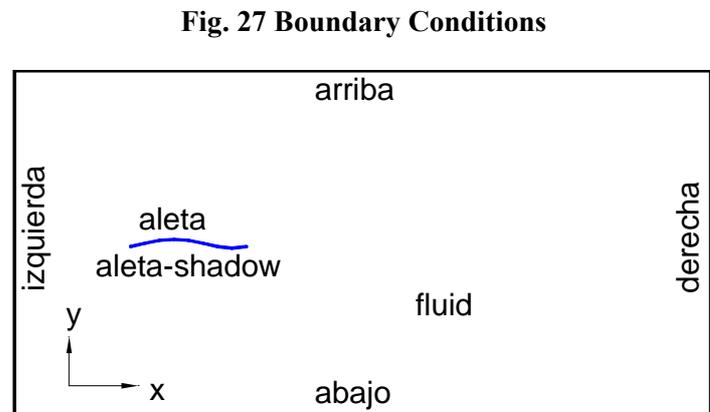
Siendo τ_{ij} el tensor de tensión viscosa.

3.3.2.2. Simulaciones equivalentes a ensayos de tracción a punto fijo: “modelo sin velocidad de entrada de flujo impuesta por izquierda”

Se aplican las siguientes condiciones de contorno:

3.3.2.2.1. Boundary conditions

Zone	Type
<i>izquierda</i>	<i>velocity-inlet</i> ($v_x = 0, v_y = 0$)
<i>derecha</i>	<i>pressure-outlet</i>
<i>arriba</i>	<i>slip wall</i>
<i>abajo</i>	<i>slip wall</i>
<i>aleta</i>	<i>no slip wall</i>
<i>aleta-shadow</i>	<i>no slip wall</i>
<i>fluid</i>	<i>water (H₂O)</i>



Fueron consideradas diversas hipótesis de rugosidad en las zonas aleta y aleta-shadow:

Roughness= 0 mm, 0.001 mm, 0.025 mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm

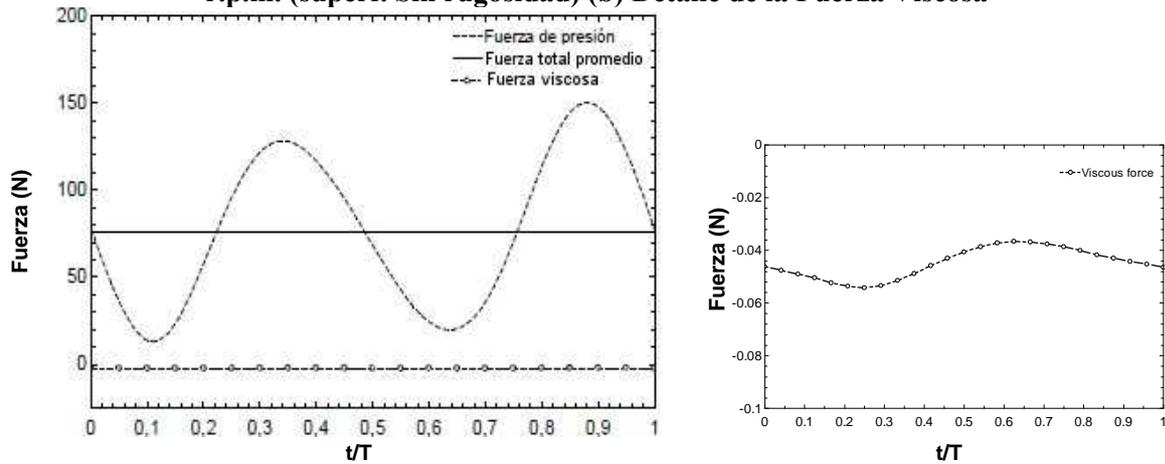
3.3.2.2.2. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en las simulaciones

Con el fin de cuantificar de forma sistemática el efecto de la oscilación de la aleta, se representa en la siguiente figura la evolución temporal de la fuerza de presión instantánea y de la fuerza viscosa. La fuerza total es casi igual a la fuerza de presión debido a que la fuerza viscosa es muy pequeña. Por esta razón en la fig. 28-a únicamente se representó la fuerza de presión instantánea y se omitió la fuerza total instantánea. En la fig. 28-b se representa la fuerza de viscosidad con un mayor detalle.

Se puede observar que la fuerza instantánea de presión alcanza en cada ciclo dos valores máximos de diferente magnitud debido a que el movimiento ondulante es no-simétrico.

3. ENSAYO CFD

Fig. 28 Evolución Temporal de la Fuerza Total, Fuerza de Presión y Fuerza Viscosa a 1000 r.p.m. (superf. Sin rugosidad) (b) Detalle de la Fuerza Viscosa



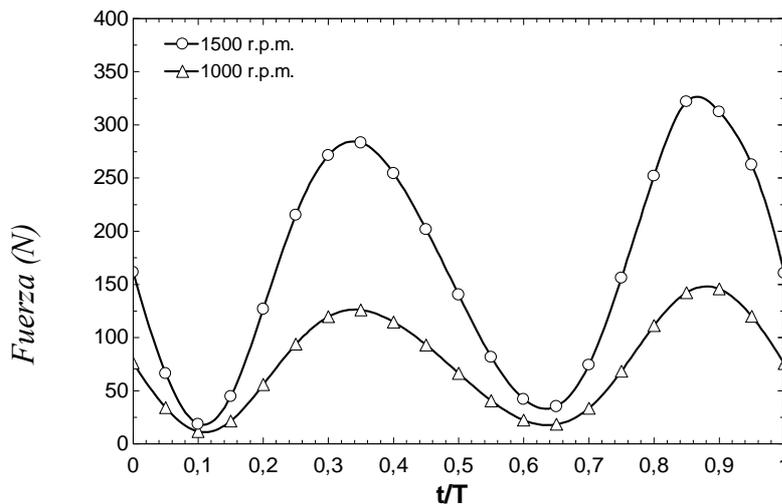
(a) Representación de las tres curvas

(b) Detalle curva de fuerza viscosa

La gráfica obtenida en ensayo CFD, que representa la fuerza de impulsión de la superficie ondulante en función del tiempo, coincide con los datos publicados en torno a la experiencia obtenida con el robot lamprea en la Northeastern University (1.2.2.9).

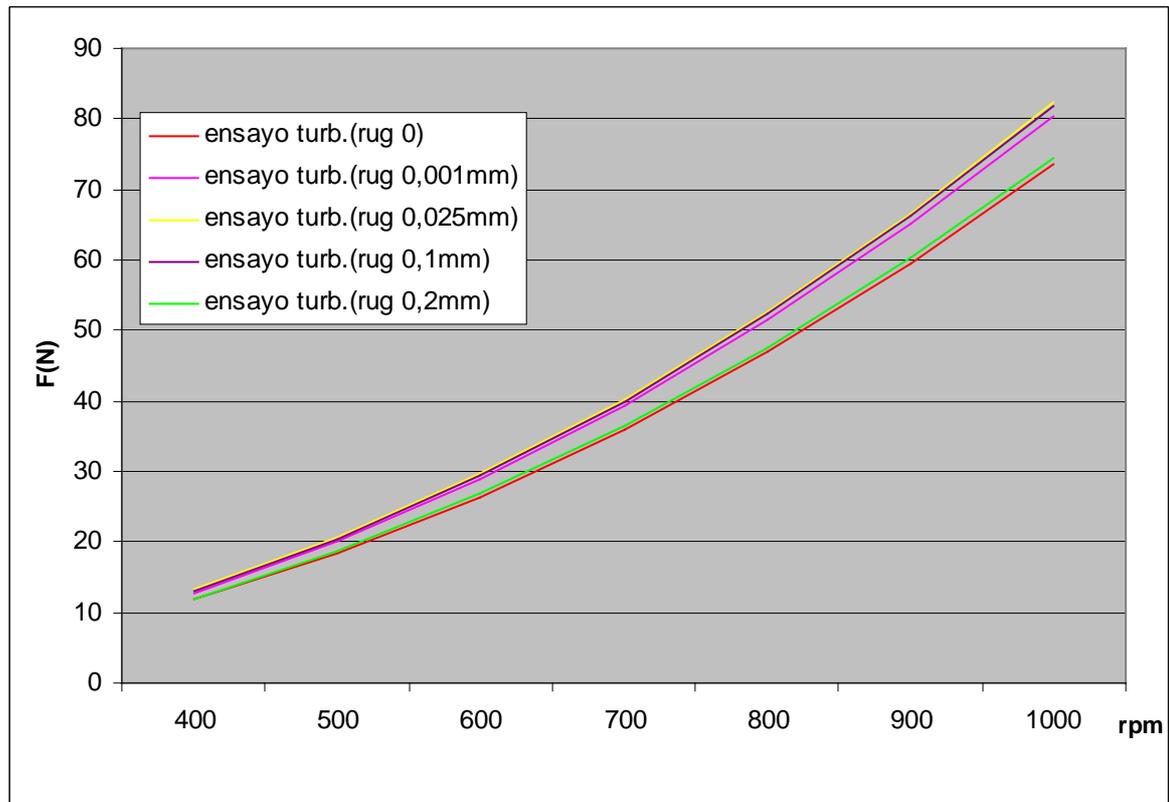
En el presente trabajo también se ha estudiado cómo se ve afectado el empuje si varía la frecuencia de oscilación del propulsor. Como era de esperar, el empuje aumenta cuando la frecuencia aumenta. Esto se muestra en la Figura 6, que representa la fuerza total instantánea para 1000 r.p.m. y 1500 r.p.m.

Fig 29. Evolución Temporal de la Fuerza Total para 1000 r.p.m. and 1500 r.p.m. (aleta considerada como superficie sin rugosidad)



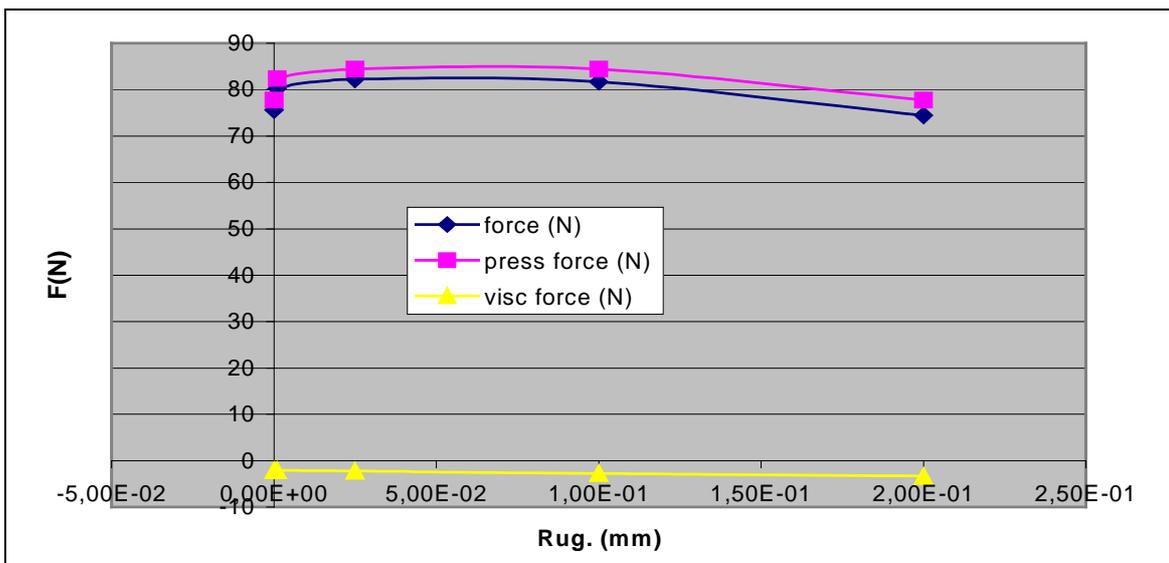
Con el fin de estudiar este fenómeno en detalle se hizo un estudio para frecuencias comprendidas entre 300 y 1000 r.p.m. y diversas hipótesis de rugosidad superficial

Fig 30. Curvas de variación de la fuerza promedio en función de la frecuencia para diversos valores de rugosidad superficial de la aleta



Se pudo comprobar que el empuje varía con la frecuencia según una función parabólica de la forma $F = K \cdot (\text{rpm})^2$ como era de esperar.

Fig 31. Curva de variación de la fuerza promedio en función de la rugosidad correspondiente a ensayos a 1000 rpm



Representando gráficamente los resultados de las simulaciones CFD considerando diversas rugosidades (fig 31) se detecta que es conveniente que la superficie de la aleta presente una

3. ENSAYO CFD

cierta rugosidad (del orden de veinticinco micras) Cuanto mayor sea la rugosidad a partir de ese valor que determina el punto de inflexión, menor va a ser la fuerza de presión que va a ejercer la aleta y mayor la fuerza resistente viscosa.

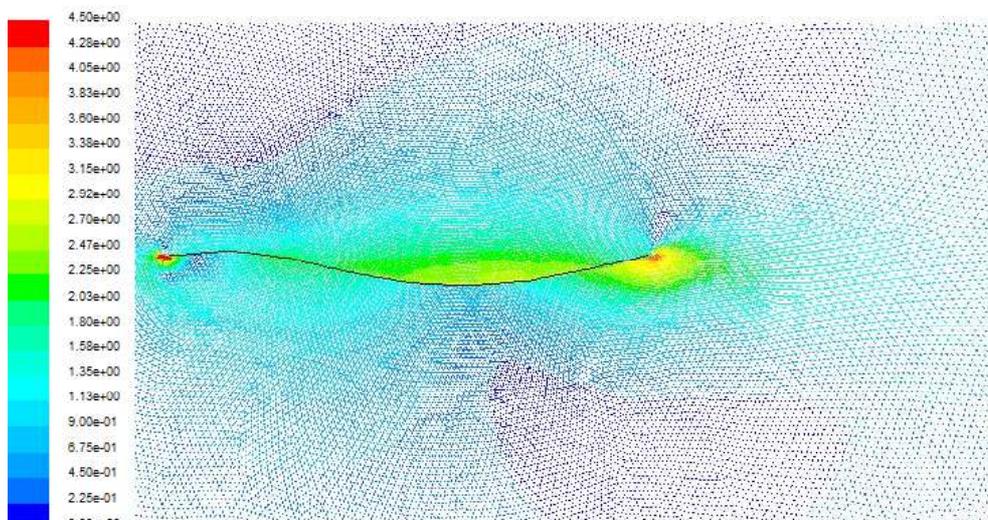
3.3.2.2.3. Campo de velocidades

El campo de velocidades para una frecuencia de 1000 r.p.m. se muestra en la Figura 32. Se han tomado cuatro instantes del ciclo correspondientes a instantes de máximo y mínimo empuje instantáneo. El mayor empuje se representa en las imágenes b) y d). Las posiciones más desfavorables de la aleta (posiciones en las que tiene lugar un menor empuje) ocurren en los instantes representados en las imágenes a) y c).

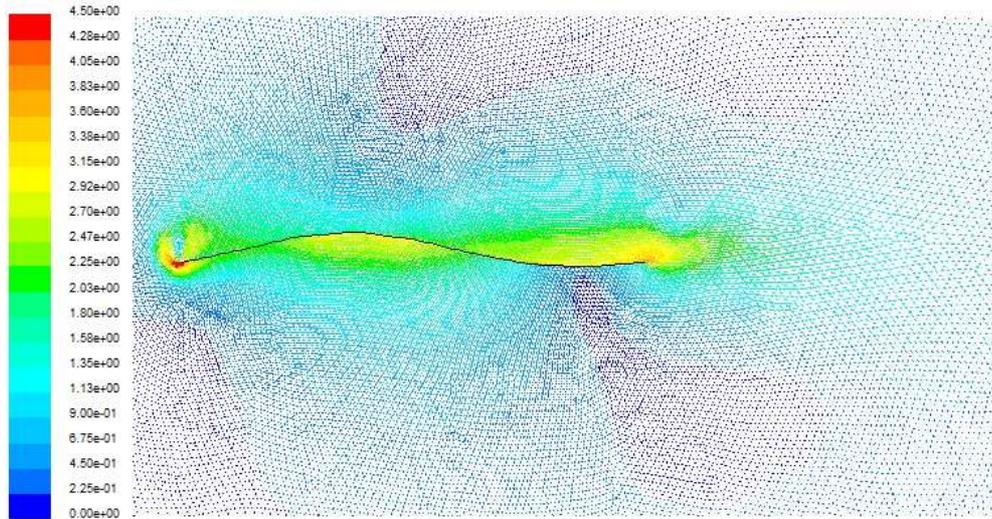
En los gráficos de Figura 32, se puede observar la formación de un fuerte chorro en la parte derecha de la aleta. Este flujo es el origen del empuje, ya que crea una fuerza que tiende a mover la aleta de derecha a izquierda. A medida que el chorro se aleja de la aleta su intensidad se reduce hasta un valor prácticamente nulo debido a la disipación viscosa.

En las figuras anteriores también se puede apreciar la formación de otro pequeño chorro en el lado izquierdo de la aleta. Este chorro produce una fuerza que tiende a mover la aleta en la dirección opuesta al anterior reduciendo la eficiencia. Sin embargo, en todas las simulaciones realizadas se verificó que esta fuerza residual es mucho menor que la primaria, por lo que puede ser prácticamente despreciada.

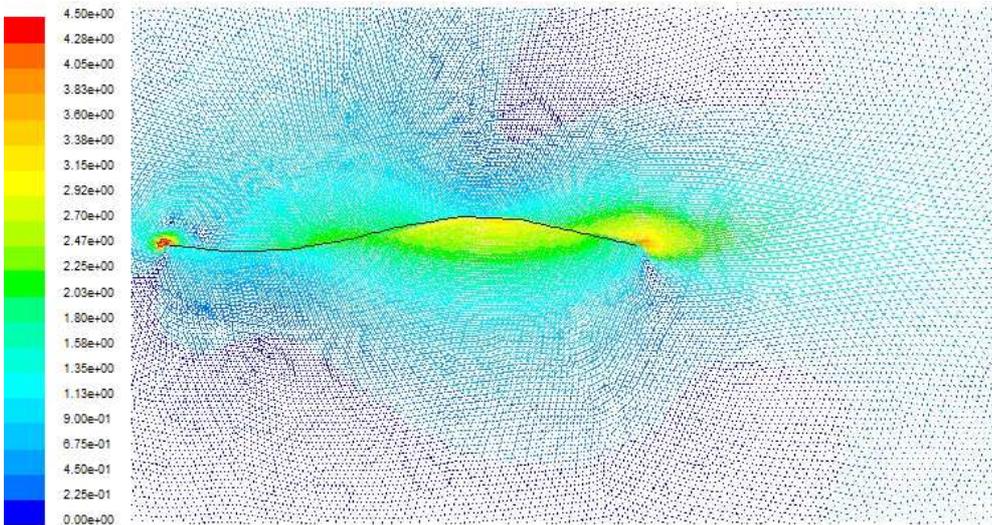
Fig. 32 Campo de Velocidades [m/s] a 1000 r.p.m : (a) $t/T=0,1$ (b) $t/T=0,35$ (c) $t/T=0,65$ (d) $t/T=0,9$



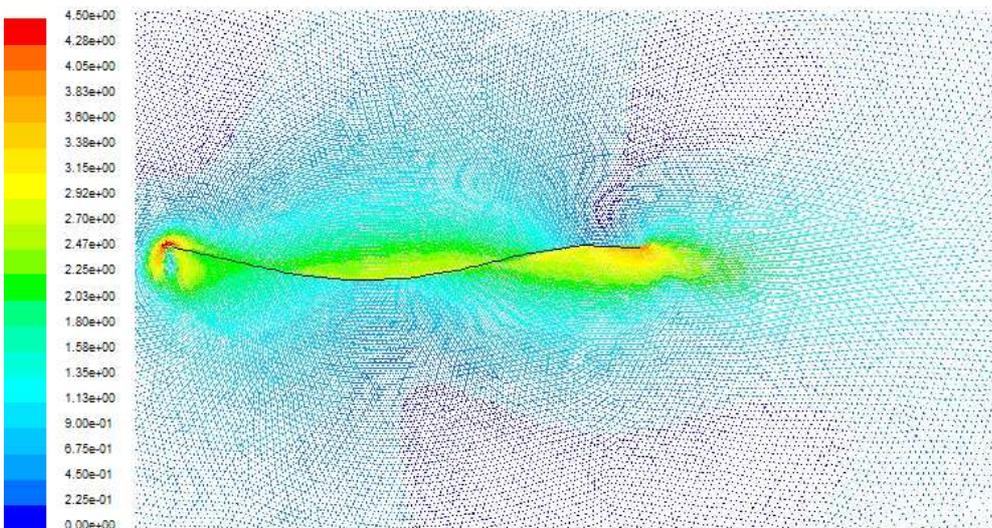
(a) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,1$



(b) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,35$



(c) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,65$



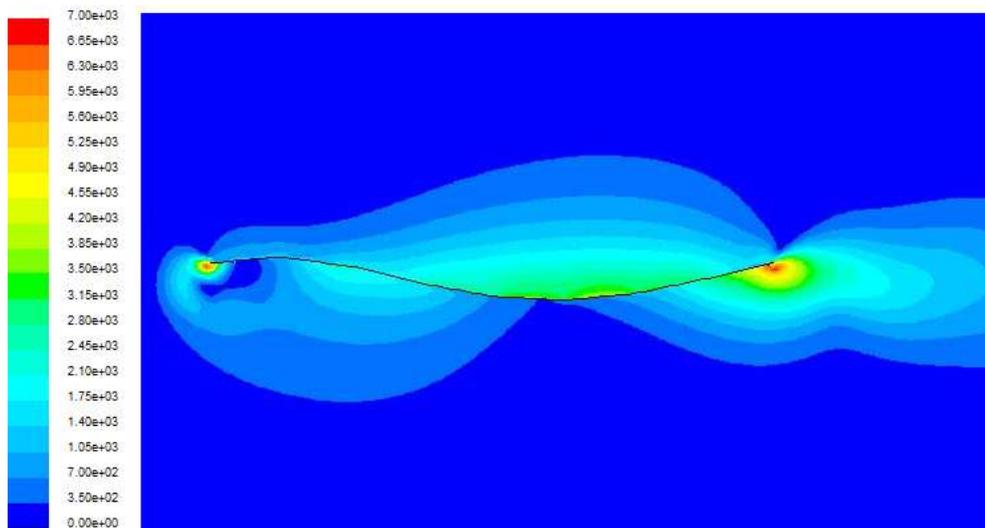
(d) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,9$

3. ENSAYO CFD

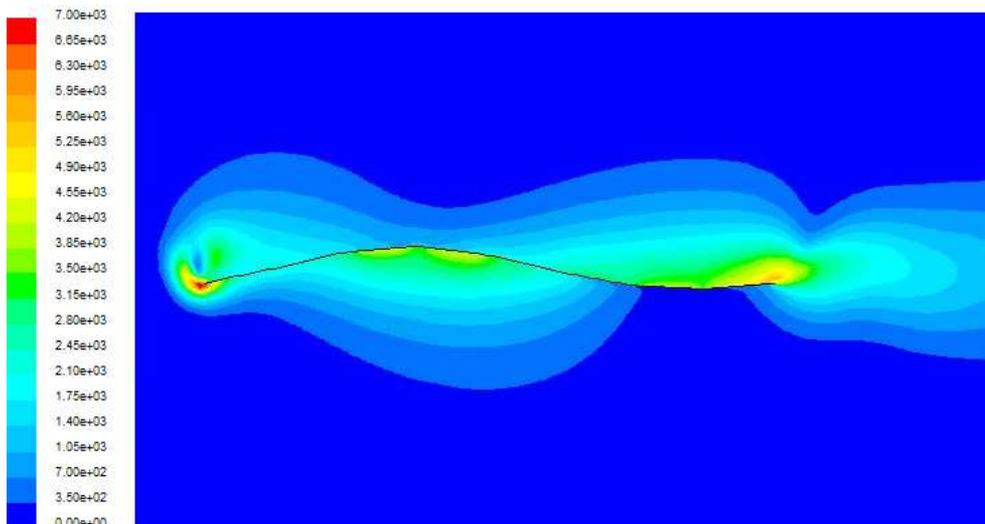
3.3.2.2.4. Campo de presiones

En la Figura 33 se muestra la distribución de la presión dinámica a 1000 r.p.m. Esta secuencia de imágenes se corresponde con el campo de velocidades mostrado en la Figura 32. Comparando ambas figuras se observa como la dirección de la velocidad se produce desde donde la presión es mayor hacia donde la presión es menor, como era de esperar. Asimismo, en el campo de presiones también se puede percibir el chorro originado en el lado derecho de la aleta, responsable del empuje generado.

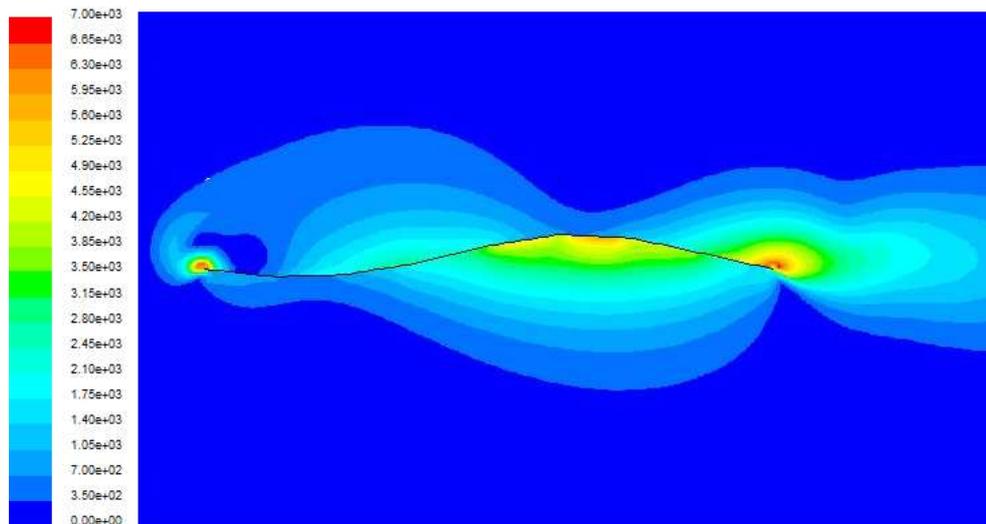
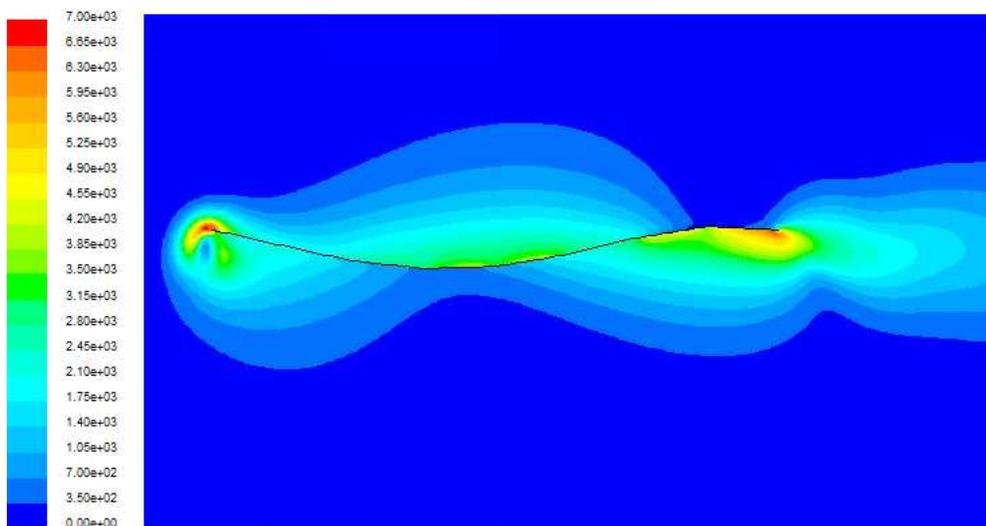
Fig. 33 Campo de presiones dinámicas [Pa] a 1000 r.p.m. para (a) $t/T=0,1$ (b) $t/T=0,35$ (c) $t/T=0,65$ (d) $t/T=0,9$



(a) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T=0,1$



(b) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T=0,35$

(c) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T=0,65$ (d) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T=0,9$

3.3.2.3. Simulaciones equivalentes a ensayos de propulsor aislado “modelo con velocidad de entrada en izquierda”

Al igual que en las simulaciones del caso anterior, se emplearán para efectuar el postproceso los campos de velocidad y presión correspondientes al ciclo nº 30

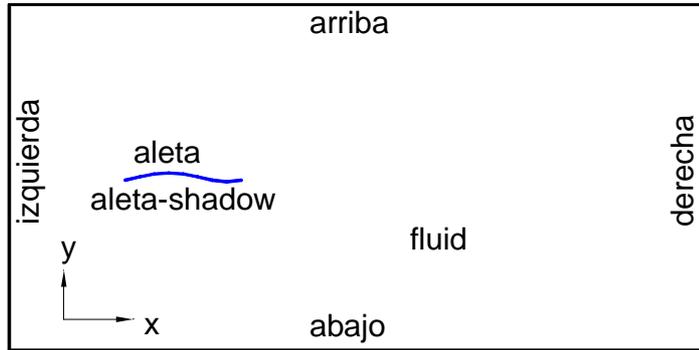
3.3.2.3.1. Boundary conditions

Se aplican las siguientes condiciones de contorno:

3. ENSAYO CFD

Zone	Type
izquierda	velocity-inlet ($v_x = 5 \text{ m/s}$, $v_y = 0$)
derecha	pressure-outlet
arriba	slip wall
abajo	slip wall
aleta	no slip wall
Aleta-shadow	no slip wall
fluid	water (H_2O)

Fig. 34 Boundary Conditions



3.3.2.3.2. Estudio adimensional realizado

En estas simulaciones se lleva a cabo un análisis adimensional. Todas las variables fueron convertidas a adimensionales mediante el empleo de los parámetros de referencia indicados en Tabla 1. Las variables adimensionales, señaladas con *, son mostradas también en la tabla.

Tabla 1. Parámetros de referencia y adimensionales.

Dimension	Parámetro referencia	Parámetro adimensional
Longitud	$L_{ref} = \lambda$ (long de onda)	$x^* = x / L_{ref}$; $y^* = y / L_{ref}$
Velocidad	$V_{ref} = f \cdot L_{ref}$	$\vec{V}^* = \vec{V} / V_{ref}$
Presión	$P_{ref} = \rho V_{ref}^2$	$P^* = P / P_{ref}$
Tiempo	$t_{ref} = L_{ref} / V_{ref} = 1 / f = T$	$t^* = t / t_{ref} = t / T$
Gravedad	$\vec{g}_{ref} = \vec{g}$	$\vec{g}^* = \vec{g} / \vec{g}_{ref}$

Para el presente análisis, la fuerza de presión y la fuerza de resistencia viscosa se han adimensionalizado mediante las expresiones (29) y (30) respectivamente.

$$C_{px} = \frac{F_{px}}{\rho f^2 L^2 b 2a} \quad (24)$$

$$C_{vx} = \frac{F_{vx}}{\rho f^2 L^2 b 2a} \quad (25)$$

Siendo el numerador de las anteriores expresiones, la expresión de la fuerza teórica que es capaz de generar la forma de onda. (punto 2.1 de la presente Tesis)

En el ámbito de la ingeniería naval:

- El empuje: $T = F_{px} + F_{vx}$
- El coeficiente de empuje: $K_T = C_{px} + C_{vx}$.
- T , para un propulsor rotativo, se adimensionaliza de la forma: $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$

El parámetro adimensional equivalente a la frecuencia de la onda se define por medio del grado de avance.

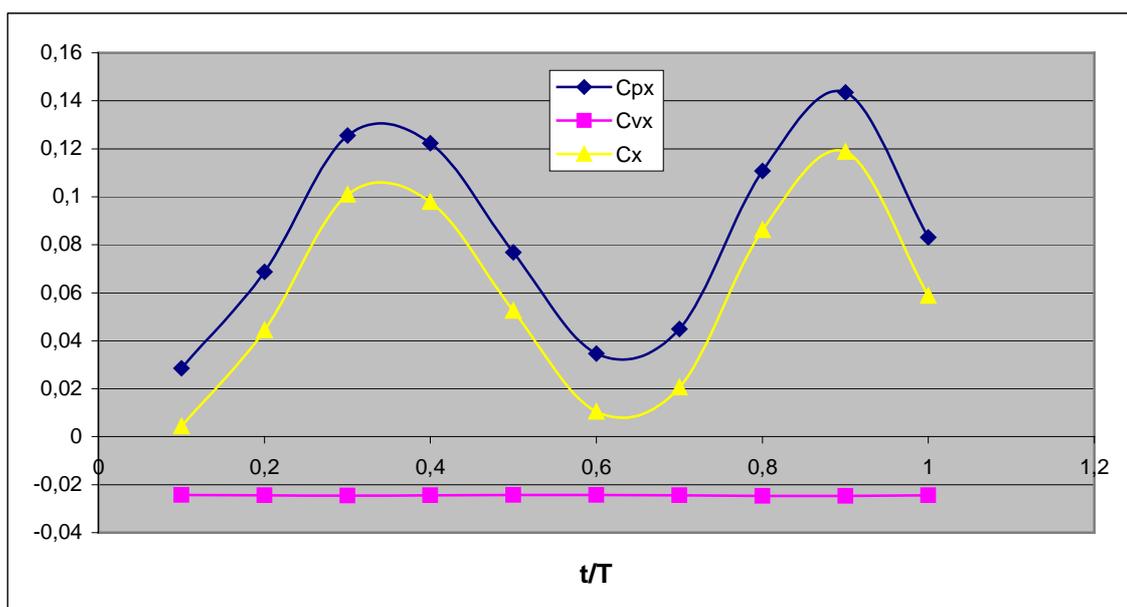
$$J = \frac{U_{\infty}}{f \cdot L} \quad (26)$$

donde U_{∞} es la velocidad impuesta en el modelo CFD (equivale a la velocidad de avance en el ensayo de propulsor aislado)

3.3.2.3.3. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en las simulaciones

Con objeto de cuantificar el efecto impulsor de la aleta se crea la figura siguiente. Esta gráfica representa el histórico del valor instantáneo del coeficiente de empuje, coeficiente de resistencia viscosa y coeficiente de fuerza total media correspondientes al ciclo nº 20.

Fig. 35 Histórico de los coef. de fuerza de presión, fuerza viscosa y fuerza total media



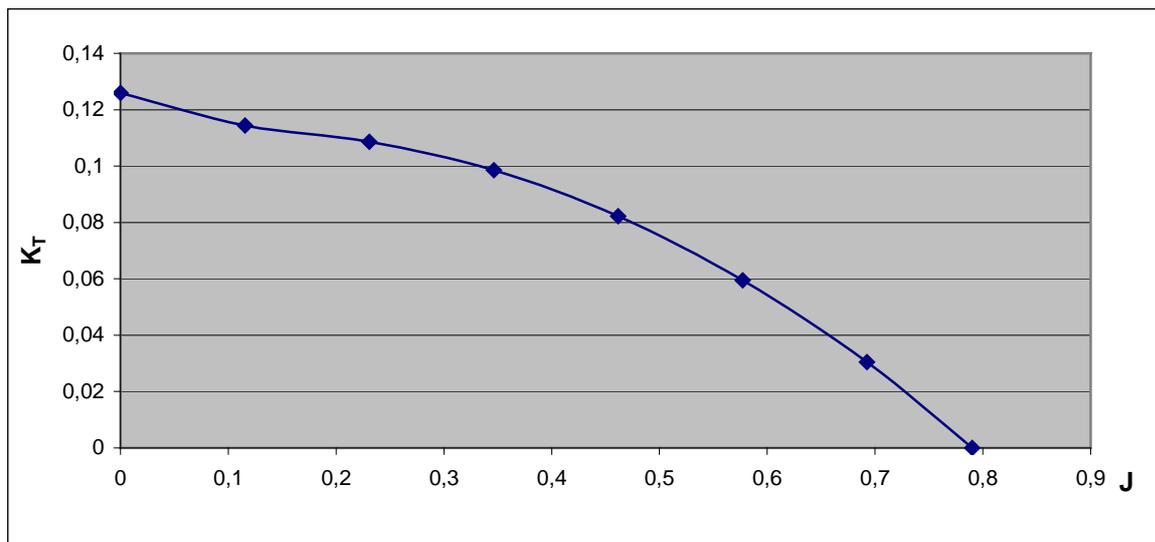
3. ENSAYO CFD

Al igual que en los ensayos del caso anterior, en los cuales no se imponía una velocidad de entrada del fluido, en este caso se observa asimismo que el coeficiente de fuerza de presión instantáneo alcanza su máximo valor dos veces en cada ciclo. Dado que la fuerza neta resultante es positiva, la superficie genera la aceleración del fluido.

Cabe destacar de los resultados de estas simulaciones, el sensible incremento de las fuerzas de viscosidad con respecto a los casos en que no se imponía una velocidad de entrada por la izquierda (Fig 43), lo cual es lógico.

Según cabía esperar, el empuje disminuye con el incremento de la velocidad de entrada. Esta tendencia se representa en una curva similar al diagrama obtenido en ensayo de propulsor aislado de una hélice (Fig. 36). la cual muestra el coeficiente de empuje K_T frente al grado de avance J , para valores entre 0 y 0.8. Dichos valores se corresponden con velocidades de entrada de 0 y 7 m/s respectivamente.

Fig. 36 Variación del coeficiente de empuje frente al grado de avance.

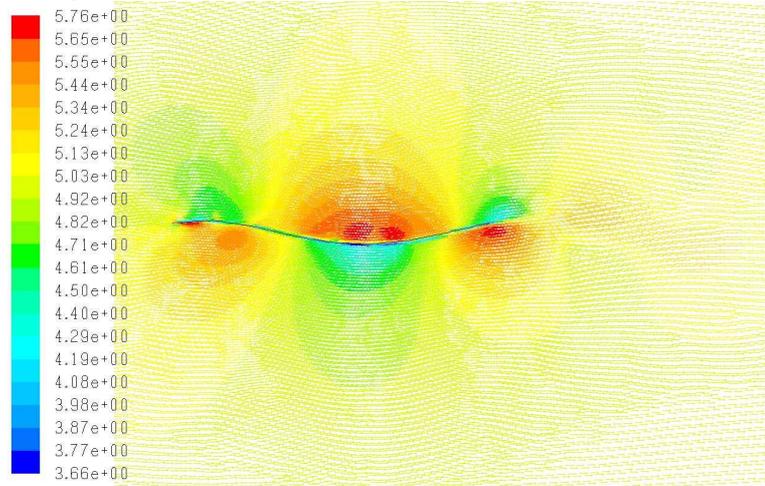


La serie de ensayos de propulsor aislado, equivalentes a los reflejados en la gráfica, a realizar con un prototipo de las mismas dimensiones que el considerado en el modelo CFD empleado, tendría que ser realizada en canal para una frecuencia fija del propulsor de $16,66 \text{ s}^{-1}$ (1.000 rpm) e incrementando la velocidad de cada carrera desde 0 hasta 7 m/s.

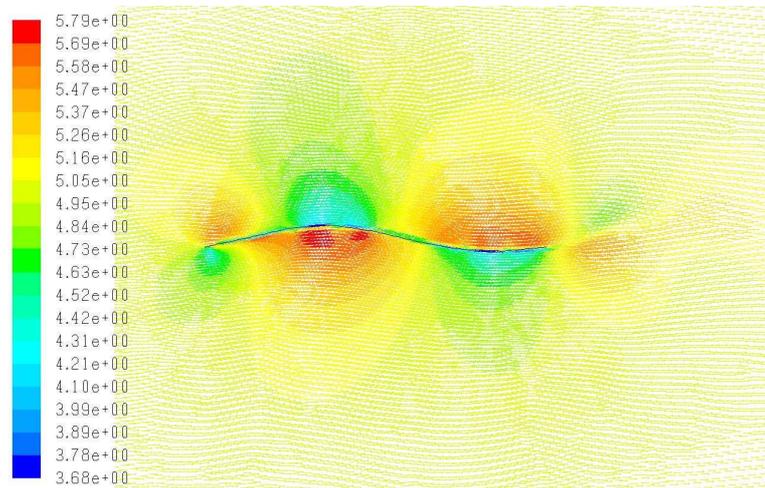
3.3.2.3.4. Campo de velocidades

El campo de velocidades para los instantes $t/T = 0,1$, $t/T = 0,35$, $t/T = 0,65$, $t/T = 0,9$ se muestra en Fig. 37.

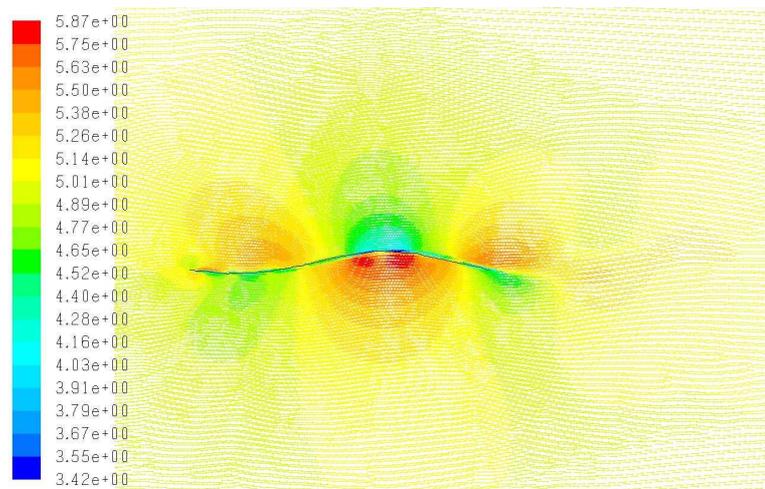
Fig. 37 Campo de velocidades [m/s] a 1000 r.p.m., $U_{\infty} = 5\text{m/s}$ para (a) $t/T=0,1$ (b) $t/T=0,35$ (c) $t/T=0,65$ (d) $t/T=0,9$



(a) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,1$

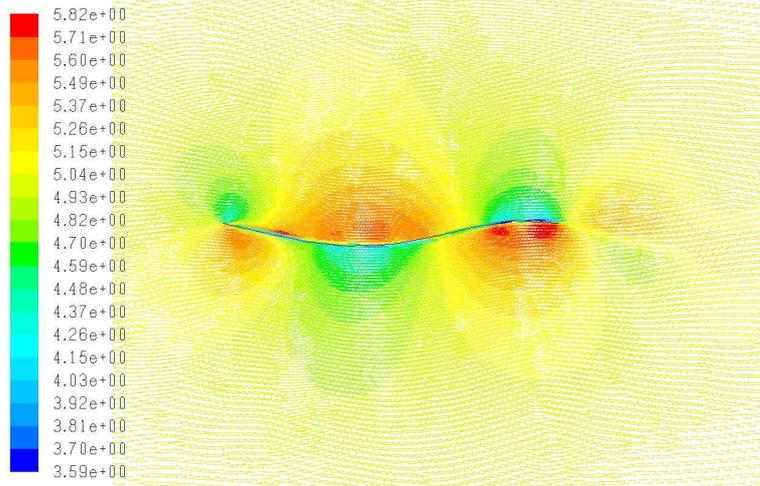


(b) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,35$



(c) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,65$

3. ENSAYO CFD



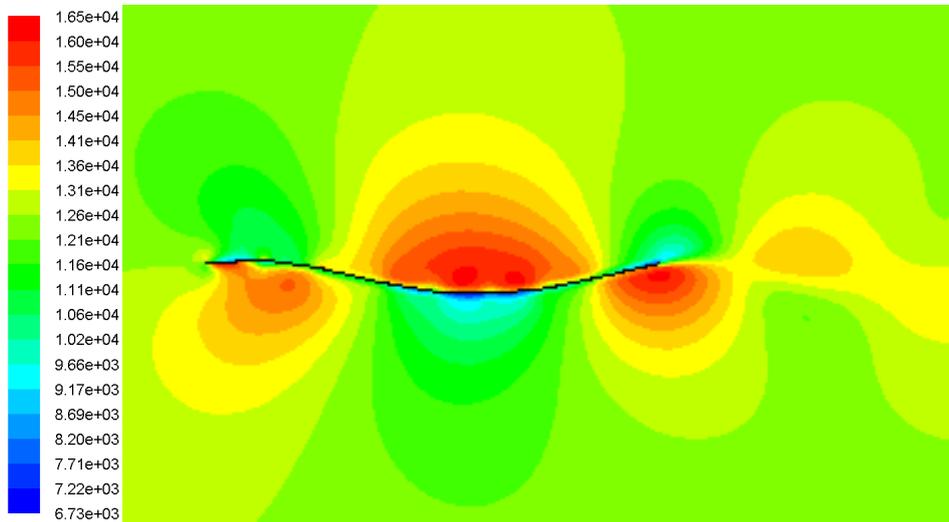
(d) Campo de velocidades en el instante $t/T = 0,9$

3.3.2.3.5. Campo de presiones

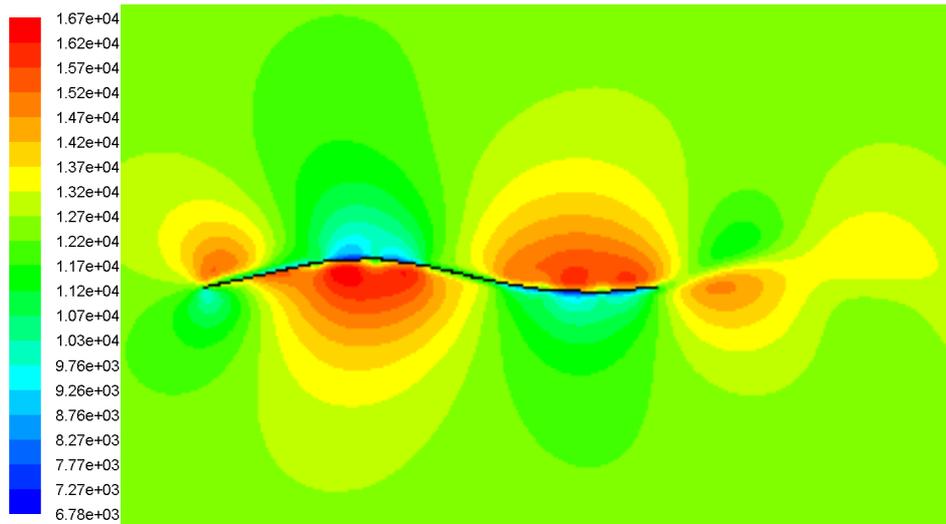
El campo de presiones para los instantes $t/T = 0,1$, $t/T = 0,35$, $t/T = 0,65$, $t/T = 0,9$ se muestra en Fig. 38.

Al igual que en el caso anterior, de la lectura de estas gráficas de campo de presiones, es fácil extraer que la fuerza de empuje de la aleta es generado prácticamente en su totalidad por el la superficie correspondiente al último cuarto aproximadamente de la misma

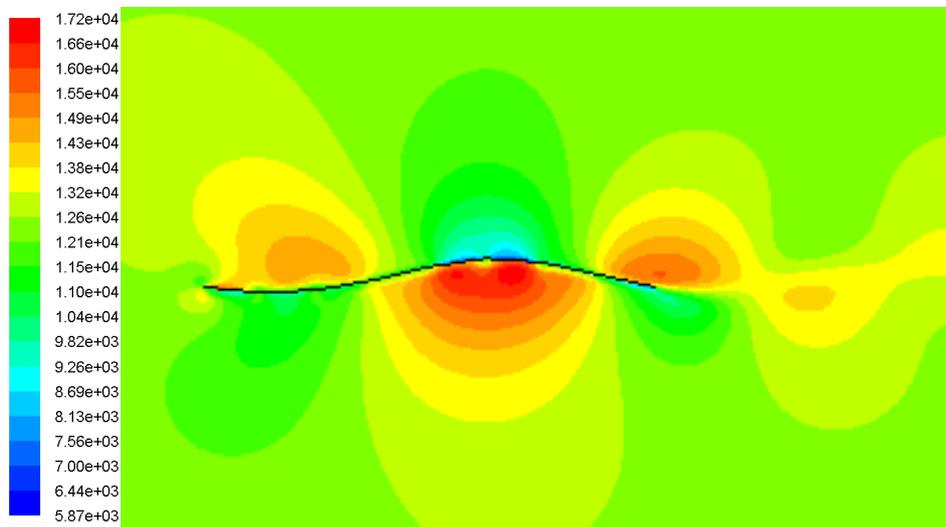
Fig. 38 Campo de presiones dinámicas [Pa] a 1000 r.p.m., $U_{\infty} = 5\text{m/s}$ para (a) $t/T=0,1$ (b) $t/T=0,35$ (c) $t/T=0,65$ (d) $t/T = 0,9$



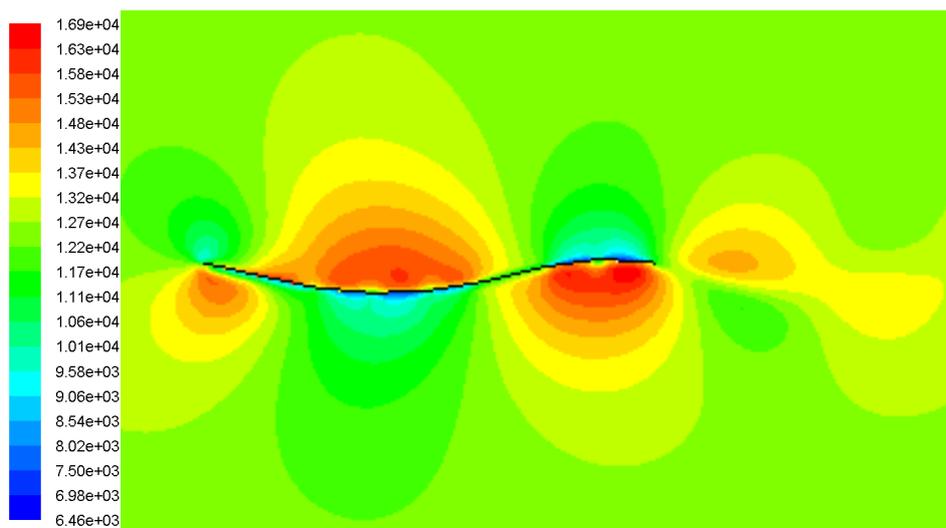
(a) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T = 0,1$



(b) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T= 0,35$



(c) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T= 0,65$



(a) Campo de presiones dinámicas en el instante $t/T= 0,9$

3. ENSAYO CFD

3.4. Simulaciones régimen laminar

Fueron efectuadas simulaciones de CFD con el modelo de flujo laminar.

El resto de consideraciones tenidas en cuenta en la configuración del solver, geometría empleada, condiciones de contorno, etc. son idénticas al caso anterior.

3.4.1. Postproceso

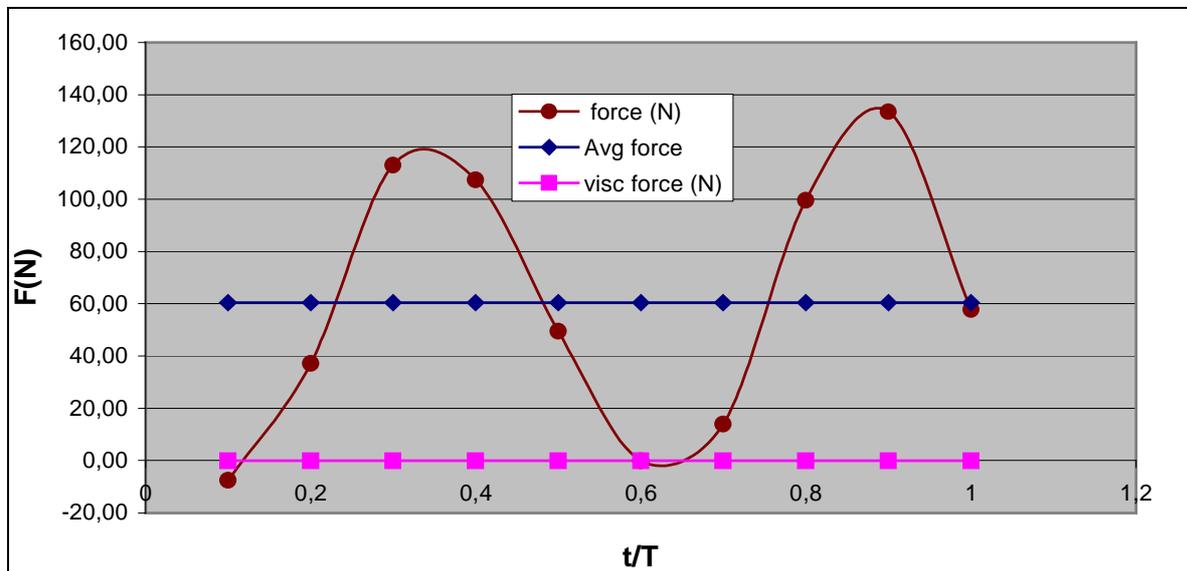
3.4.1.1. Simulaciones equivalentes a ensayos de tracción a punto fijo “modelo sin velocidad de entrada de flujo impuesta por izquierda”

3.4.1.1.1. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en el ensayo

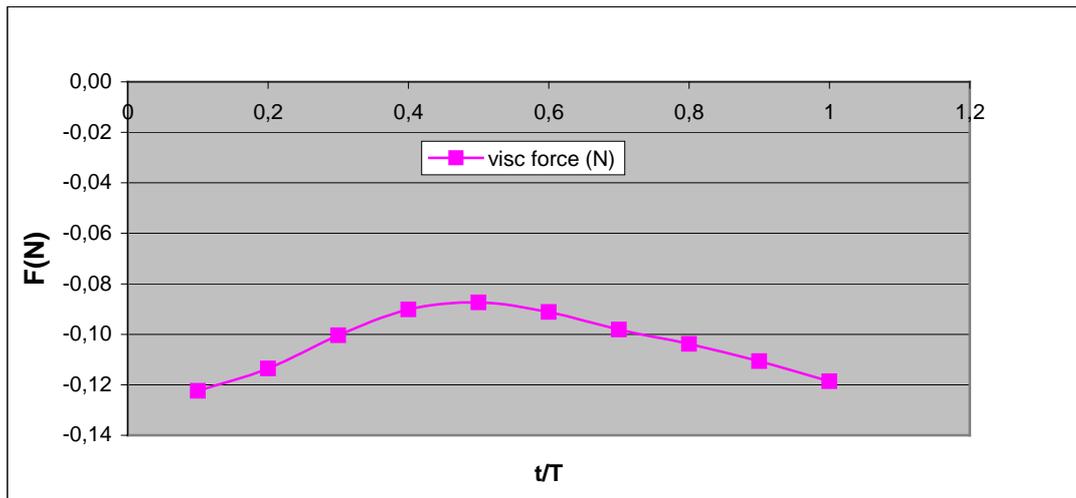
En la siguiente figura se representa la evolución temporal de la fuerza de presión instantánea y de la fuerza viscosa. En la fig. 39-b se representa la fuerza de viscosidad con un mayor detalle.

Se puede observar que los gráficos generados son cualitativamente similares a los creados en las simulaciones con modelo de turbulencia.

Fig. 39 Evolución Temporal de la Fuerza Total, Fuerza de Presión y Fuerza Viscosa a 1.000 r.p.m. (b) Detalle de la Fuerza Viscosa

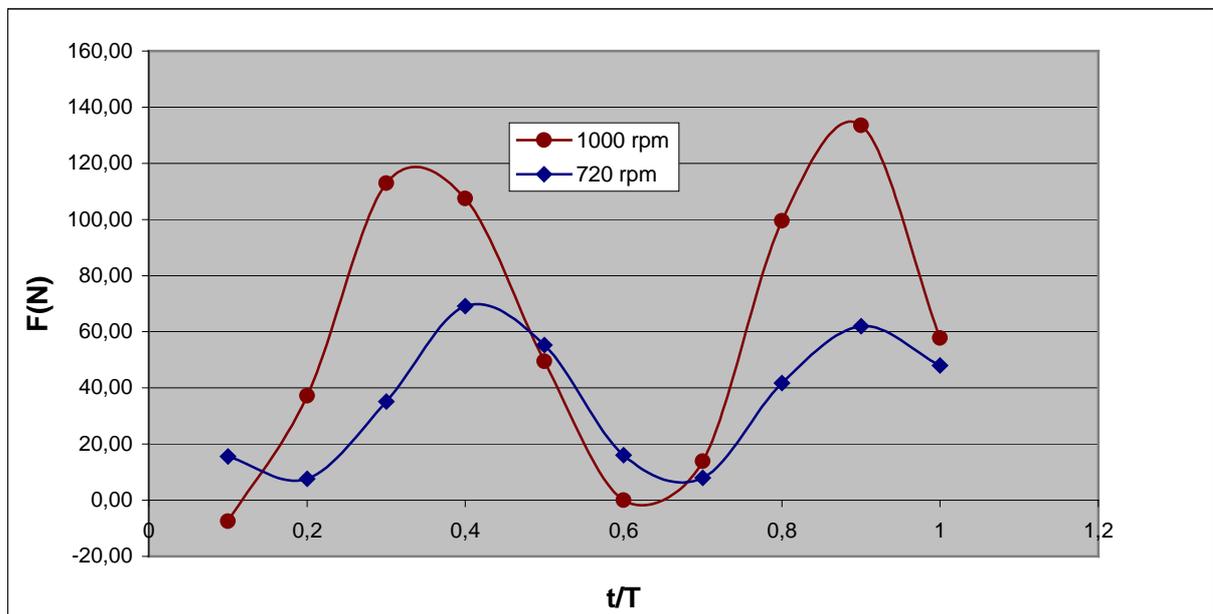


(a) Representación de las tres curvas



(b) Detalle curva de fuerza viscosa

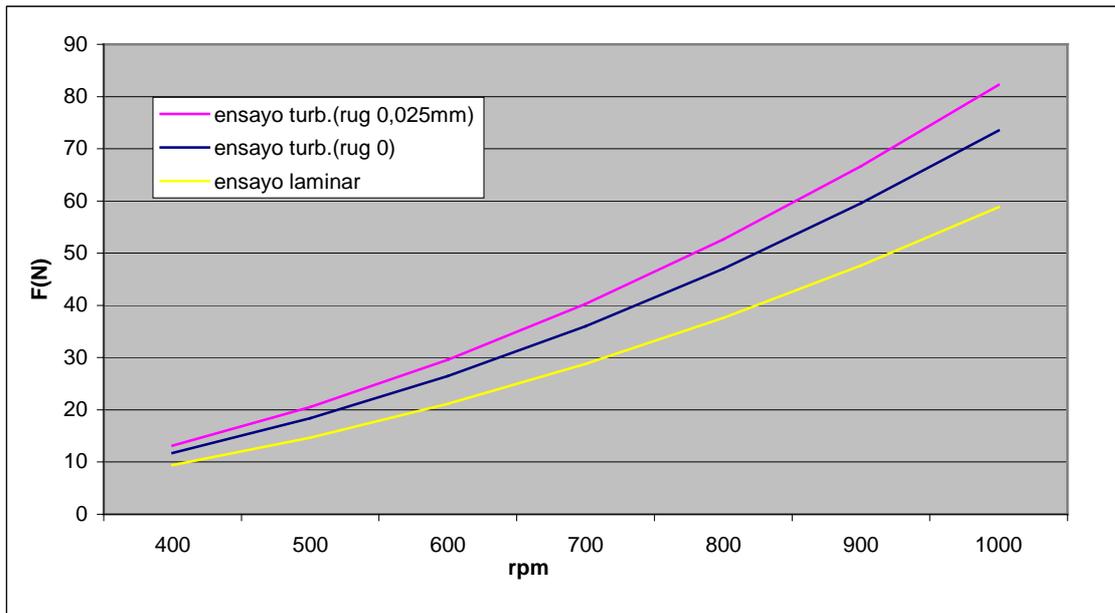
En el presente trabajo también se ha estudiado cómo se ve afectado el empuje si varía la frecuencia de oscilación del propulsor. Como era de esperar, el empuje aumenta cuando la frecuencia aumenta. Esto se muestra en la Figura 40, que representa la fuerza total instantánea para 1000 r.p.m. y 720 r.p.m.

Fig 40. Evolución Temporal de la Fuerza Total para 1000 r.p.m. y 720 r.p.m.

Con el fin de estudiar este fenómeno en detalle se hizo un estudio para frecuencias comprendidas entre 400 y 1000 r.p.m. Tal como se aprecia en la fig 41, el empuje obtenido con el modelo de flujo turbulento resulta mayor que el obtenido con el modelo laminar.

3. ENSAYO CFD

Fig 41. Curva de variación de la fuerza promedio en función de la frecuencia



3.4.1.2. Simulaciones equivalentes a ensayos de propulsor aislado “modelo sin velocidad de entrada de flujo impuesta por izquierda”

Para el presente análisis, la fuerza de presión, la fuerza de resistencia viscosa y la frecuencia de la onda se han adimensionalizado de modo similar al efectuado en las simulaciones con modelo turbulento.

$$C_{px} = \frac{F_{px}}{\rho f^2 L^2 b 2a} \quad (24)$$

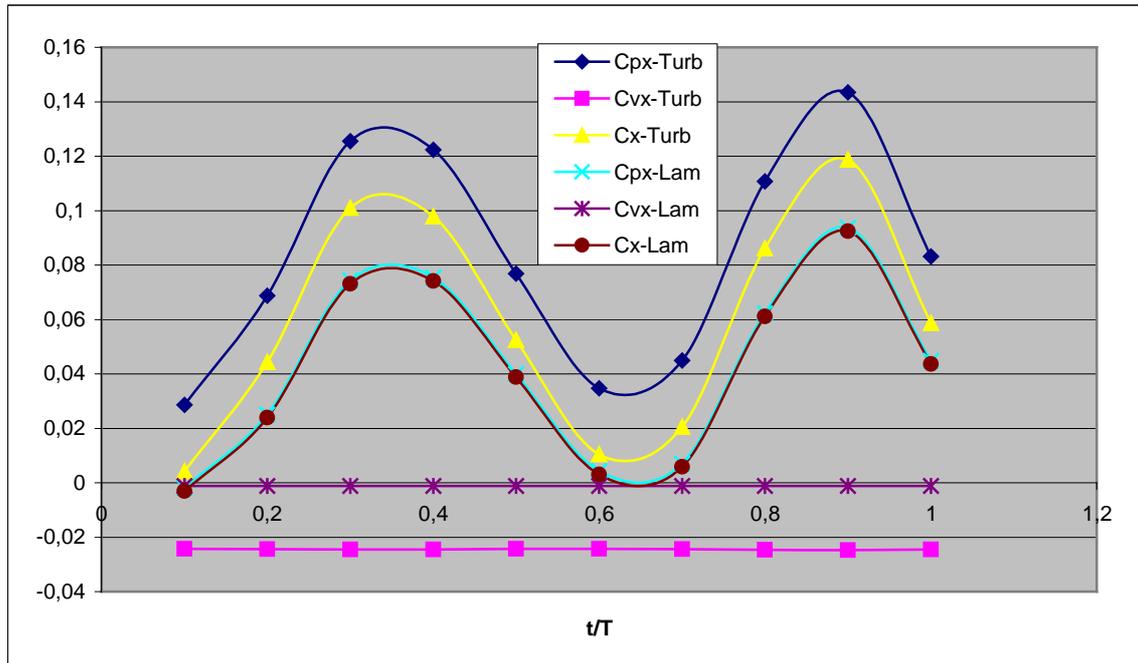
$$C_{vx} = \frac{F_{vx}}{\rho f^2 L^2 b 2a} \quad (25)$$

$$J = \frac{U_{\infty}}{f \cdot L} \quad (26)$$

3.4.1.2.1. Fuerzas hidrodinámicas alcanzadas en las simulaciones

Con objeto de comparar el efecto impulsor de la aleta en el modelo laminar con respecto al modelo turbulento se crea la figura siguiente. Esta gráfica representa el histórico del valor instantáneo del coeficiente de empuje, coeficiente de resistencia viscosa y coeficiente de fuerza total media correspondientes al ciclo n° 20 para uno y otro tipo de régimen.

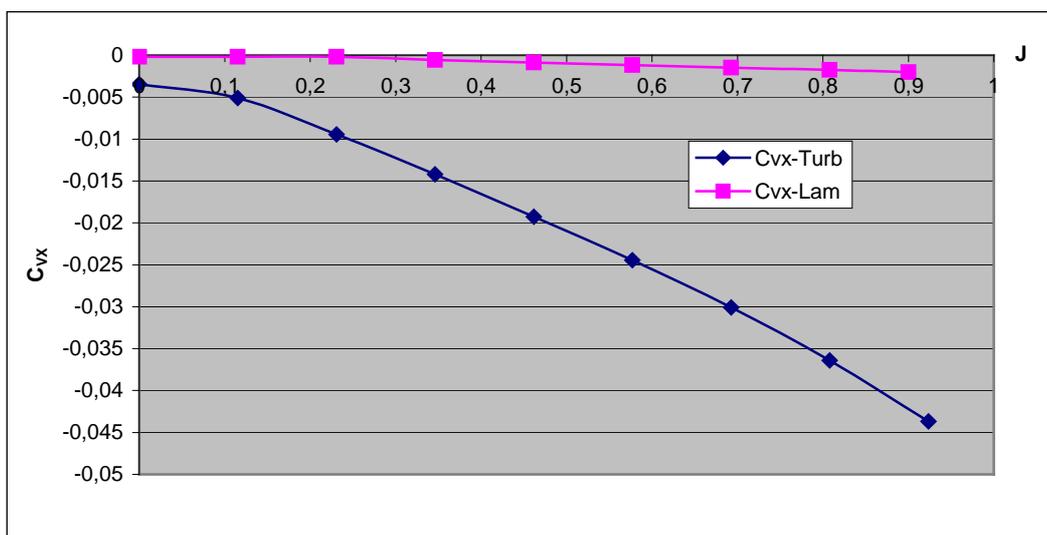
Fig. 42 Histórico de los coeficientes de fuerza de presión, fuerza viscosa y fuerza total media. Comparativa con modeloturbulento



Al igual que en el reto de casos, en éste se observa asimismo que el coeficiente de fuerza de presión instantáneo alcanza su máximo valor dos veces en cada ciclo. Dado que la fuerza neta resultante es positiva, la superficie genera la aceleración del fluido.

Cabe destacar de los resultados de estas simulaciones, que en el modelo laminar el incremento de las fuerzas viscosas con respecto a la velocidad de avance es muy inferior al que se observa en el modelo turbulento.

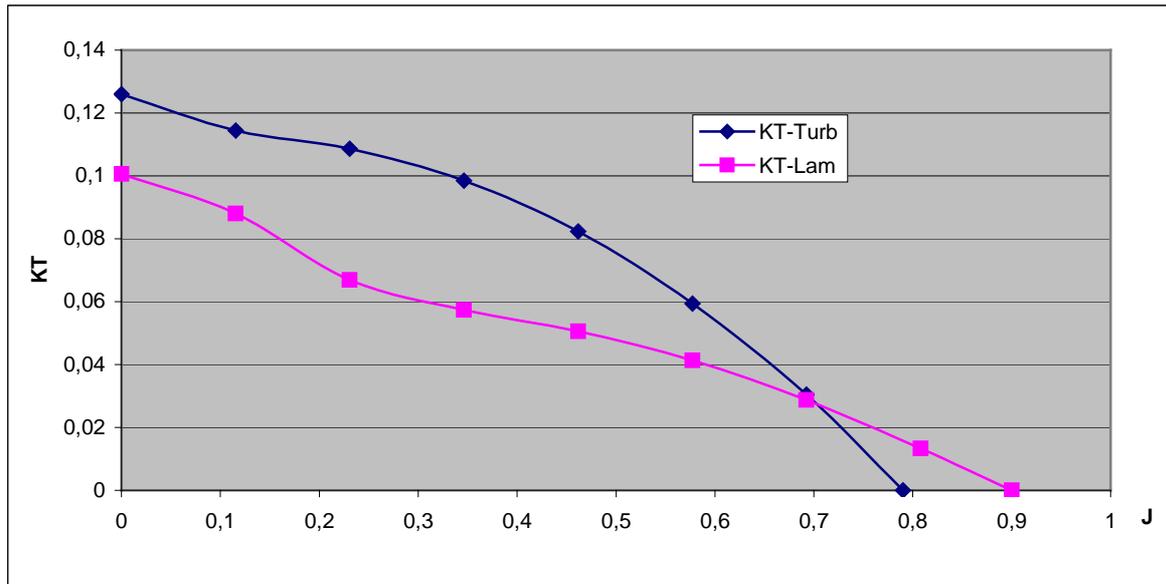
Fig. 43 Variación de los coeficientes de fuerza viscosa frente al grado de avance



3. ENSAYO CFD

Según cabía esperar, el empuje disminuye con el incremento de la velocidad de entrada. Esta tendencia se representa en una curva correspondiente al diagrama de propulsor aislado (Fig. 44). la cual muestra el coeficiente de empuje K_T frente al grado de avance J , para valores entre 0 y 0.9. Dichos valores se corresponden con velocidades de entrada de 0 y 7,8 m/s respectivamente.

Fig. 44 Variación del coeficiente de empuje frente al grado de avance.



4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

4.1. Elección del modo de desplazamiento y del mecanismo de accionamiento

4.1.1. Antecedentes de superficies propulsoras

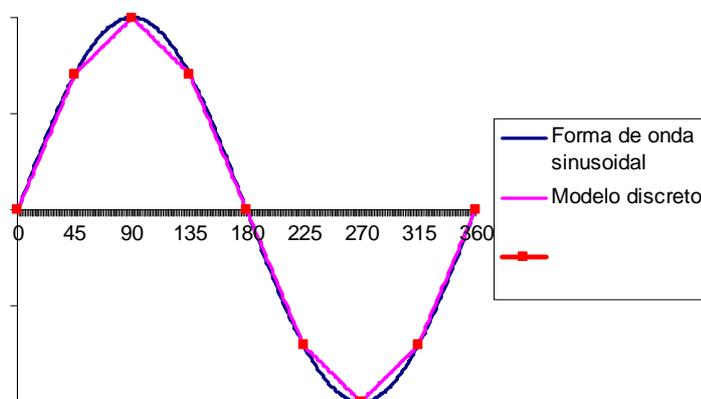
Institución	Actuador	Modo de desplazamiento	Referencias
Universidad Northeastern, USA	Aleación con memoria de forma (SMA)	Anguiliforme	Ayers et al. 2000
MIT - Universidad de Massachusetts, USA	Accionamiento mecánico	Carangiform	Denis et al. 2000
Heriot Wat University, UK	Parallel Bellow Actuator (PBA)	MPF (pectoral)	Sfakiotakis et al. 2001
Universidad de Osaka, Japón	Ionic Conducting Polymer Film (ICPF)	Carangiforme	Guo et al. 2003
Universidad de Nuevo México, USA	Ionic Polimeric Conductor Composite (IPCCs)	Carangiforme	Mojarrad Shahimpoor 2007
Lab UMR CMRS Francia	Ionic Polymer Metal Composite (IPMCs)	Carangiforme	Guillaume y Piat 2001
Universidad de Nagoya, Japón	Actuadores piezoeléctricos	MPF (pectoral)	Fukuda et al 1994

4.1.2. Superficies propulsoras consideradas para el prototipo objeto de diseño

El objetivo planteado consistía en diseñar un sistema de propulsión en medio fluido de inspiración biológica, por tanto se decidió reproducir la forma ondulante de una aleta de pez.

Con el fin de simplificar nuestra modelización, la aleta (con forma ondulada) se dividió en un número concreto de porciones de membrana con forma plana (segmentos de membrana).

Fig. 45 Modelo discreto de forma de onda sinusoidal obtenida mediante una serie de segmentos rectos que unen puntos cada 45°



4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

Para el diseño del mecanismo de accionamiento de la superficie propulsora ondulante fue estudiado el empleo de actuadores lineales hidráulicos, neumáticos, electromagnéticos, etc. pero fueron opciones desechadas por cuanto que los citados actuadores no garantizaban una determinada posición relativa entre sí en función del tiempo. Fue asimismo desechada la opción del empleo de accionamientos individuales basados en motores eléctricos de corriente continua debido a sus limitaciones en cuanto a la cantidad de potencia que podían entregar.

Finalmente se decidió el diseño de un mecanismo de conversión del movimiento tipo cadena cinemática. A este respecto fueron propuestos varios mecanismos típicos de conversión del movimiento de rotación de un par motor en un movimiento armónico lineal:

4.1.2.1. Superficie propulsora tipo aleta anal emulando el modo de nado *gymnotiforme* (MPF)

La superficie que se ha de reproducir físicamente es la que crea una generatriz cuyo extremo superior mantiene una trayectoria casi rectilínea mientras que el extremo opuesto se desplaza siguiendo una directriz ondulante. En la naturaleza se pueden encontrar múltiples ejemplos de esta forma de desplazamiento, sin ir más lejos: en el modo de nado de un knife fish

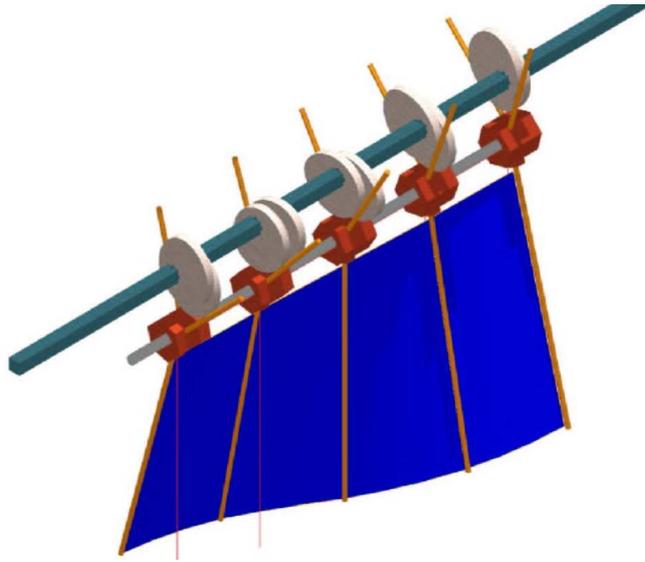
Fig. 46 Fotografía de un knife fish.



4.1.2.1.1. Accionamiento mediante levas

El accionamiento mediante levas fue, con anterioridad, construido y ensayado para el primer prototipo de propulsor ondulatorio con el que se trabajó. En este sistema el movimiento de rotación aportado por un par motor se convierte en un movimiento regular de oscilación mediante la acción de las levas. Este método fue finalmente desechado por la elevada potencia que se disipa en el rozamiento de las levas.

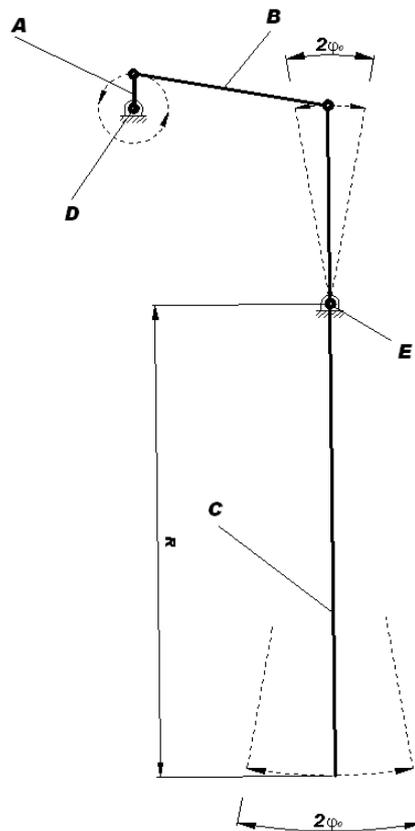
Fig. 47 Aleta anal similar a la de un knife fish generada mediante levas.



4.1.2.1.2. Accionamiento mediante sistemas biela – manivela

Con esta filosofía, cada varilla articuladora de la superficie ondulante realiza un movimiento regular de oscilación dado que forma parte de un sistema biela – manivela (fig. 48).

Fig. 48 Fundamento de funcionamiento por medio de sistema biela-manivela.



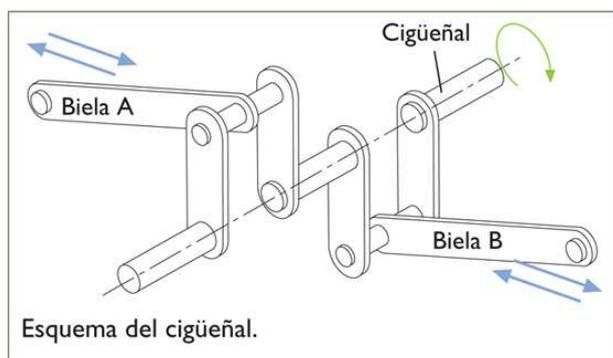
4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

- A. representa una manivela que describe un movimiento de rotación en torno a un eje
- B. esquematiza una biela que transmite a la varilla oscilante el movimiento de la manivela
- C. varilla articuladora de la membrana flexible ondulatoria, realiza un movimiento regular oscilante con amplitud $(-\varphi_0 + \varphi_0)$
- D. esquematiza el eje motriz que transmite un movimiento de rotación a la manivela
- E. representa el eje soporte sobre el cual oscilan las varillas articuladoras de la membrana

Diversos mecanismos de conversión de movimiento tipo biela – manivela fueron considerados:

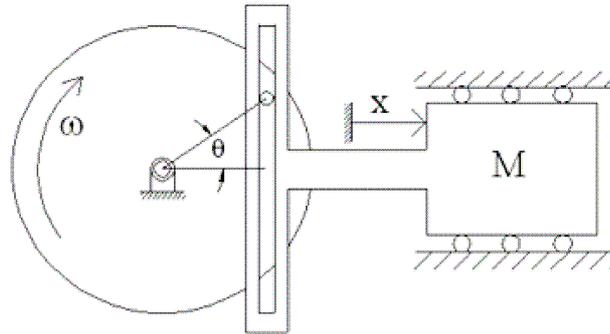
- a) El cigüeñal: posteriormente desechado por la dificultades que entrañaba su construcción en taller.

Fig. 49 Fundamento de funcionamiento de un cigüeñal



- b) El yugo escocés: realiza básicamente la misma función que una manivela simple, pero la gráfica correspondiente al movimiento lineal de salida corresponde a una senoide pura. Según la definición del Mechanical Engineering, se entiende por yugo escocés “an apparatus with a four-bar linkage arrangement that converts rotary motion into simple harmonic motion” (un aparato con un mecanismo de cuatro barras que convierte un movimiento rotatorio en un movimiento armónico simple) Este principio de transformación de movimiento fue igualmente desechado por causa de la complejidad constructiva que implicaba

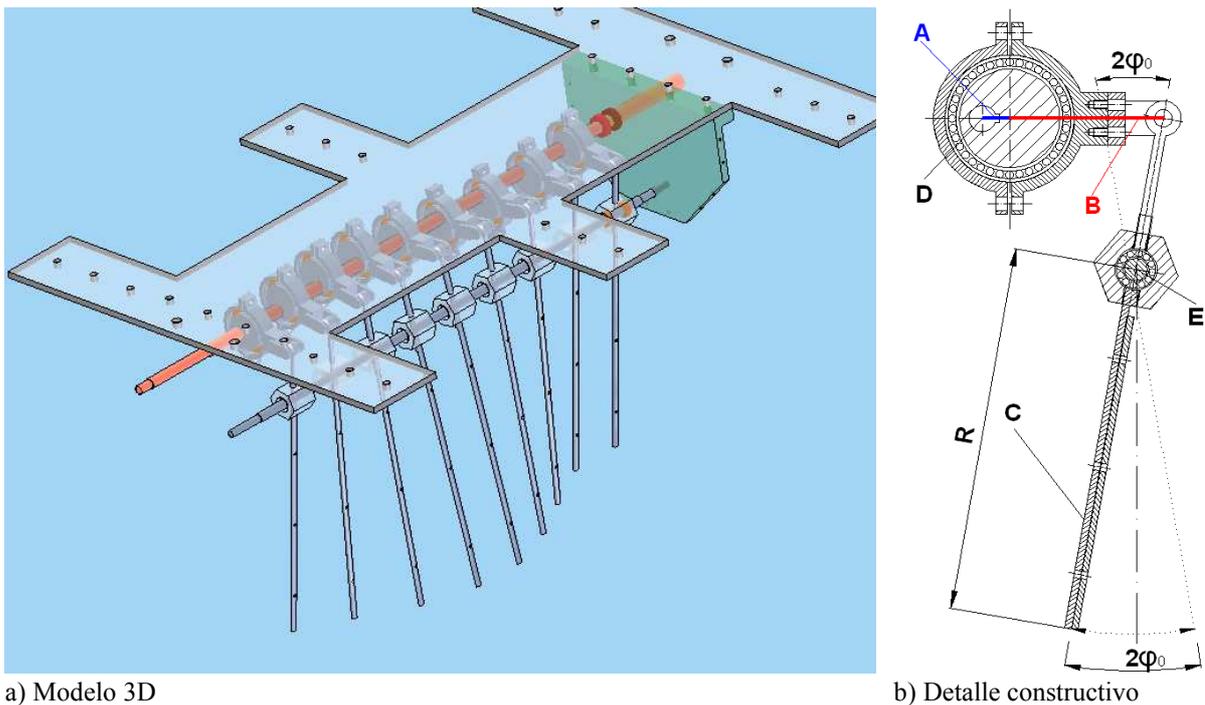
Fig. 50 Esquema de mecanismo de conversión tipo yugo escocés.



4.1.2.1.3. Mecanismo de conversión del movimiento de rotación mediante excéntricas

Fue propuesto un mecanismo de conversión de movimiento mediante excéntricas, buscando que fuese capaz de mejorar el rendimiento del anterior prototipo basado en levas, y fue modelado empleando para ello el software SOLID EDGE, de diseño mecánico 3D.

Fig. 51 Esquema de mecanismo de conversión basado en excéntricas.



a) Modelo 3D

b) Detalle constructivo

En Fig. 51 se expone el fundamento del funcionamiento de un mecanismo correspondiente al sistema de transmisión por medio de excéntricas: este sistema induce en la varilla un movimiento oscilatorio de amplitud $(-\varphi_0 + \varphi_0)$

Se representa una excéntrica: su disco, collar, barra de transmisión y la varilla oscilatoria a la cual transmite el movimiento.

4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

- A: manivela equivalente, cuya longitud es igual a la distancia existente entre el centro del eje de excéntricas y el centro del disco de una excéntrica.
- B: biela equivalente, cuya longitud es igual a la distancia existente entre el centro del disco de una excéntrica y el extremo superior de su correspondiente varilla
- C: varilla con movimiento oscilatorio de amplitud $(-\varphi_0 + \varphi_0)$ y que soporta la membrana flexible ondulatoria en su extremo de longitud R.
- D: eje motriz que transmite un movimiento de rotación a la excéntrica
- E: representa el eje soporte sobre el cual oscilan las varillas articuladoras de la membrana

Con el objeto de eliminar rozamientos se incluyeron rodamientos radiales de bolas entre cada disco y collar de las excéntricas. Asimismo, de esta manera, se posibilita la reversibilidad del sentido de transmisión de potencia del mecanismo. El propio software de diseño mecánico permite simular el movimiento del mecanismo con el objeto de determinar si existen colisiones entre piezas o incompatibilidad entre las mismas.

Una vez simulado el correcto funcionamiento del mismo fue protegido con patente de invención P200500384 (21/02/2005)

4.1.2.2. Superficie propulsora que emula el modo de nado *anguiliforme* (BCF)

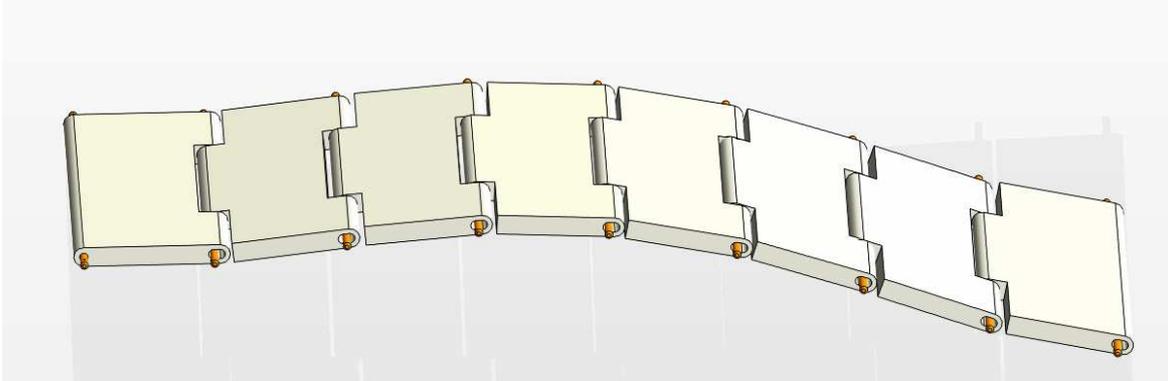
De la experiencia obtenida tras los ensayos en tanque realizados con el anterior prototipo basado en mecanismo de levas se extrajo una problemática asociada a la forma de la superficie generada:

- a) Si se diseñaban los segmentos para trabajar con elasticidad, el motor de accionamiento debía invertir parte de su potencia en vencer la resistencia de la lámina elástica. Esto a su vez exigía el diseño de un mecanismo de accionamiento lo suficientemente robusto como para que no se deformase ninguna pieza. En los experimentos realizados en taller, el material empleado en la construcción de la superficie ondulante: lámina de neopreno de 1mm de espesor, era tan rígido que provocaba la deformación del esqueleto que la articulaba.
- b) Si se diseñaban los segmentos de neopreno para trabajar sin estiramiento elástico, la membrana propulsora iba a crear unos pliegues que afectarían negativamente a la hidrodinámica de la forma de onda.

Por tanto se decide el diseño una superficie deformable, formada por una serie de segmentos rígidos, accionada de tal manera que sea capaz de adquirir la forma aproximada

de una senoide. De esta manera se salvan las dificultades técnicas inherentes a las membranas elásticas antes mencionadas.

Fig. 52 Detalle de superficie articulada ondulante para impulsión de fluidos.



La superficie propulsora concebida, accionada del modo adecuado, presenta la capacidad de reproducir el modo de desplazamiento conocido como anguiliforme, del cual existen numerosos y conocidos ejemplos en la naturaleza: anguilas, morenas, congrios, lampreas, etc.

Fig. 53 Imagen de un congrio en su desplazamiento



La superficie propulsora concebida mediante el empleo de segmentos rígidos aporta un avance en el estado de la técnica con respecto a las soluciones propuestas en los distintos prototipos construidos hasta la fecha. Con una aleta construida de esta manera se puede pensar en un propulsor que realmente sea capaz de entregar una potencia de impulsión alta.

Esta superficie ondulante para impulsión de fluidos, se caracteriza porque es generada mediante n segmentos rígidos, cada uno de los cuales incorpora dos orificios con objeto de dar alojamiento a sus respectivos ejes articuladores: uno de ellos de forma cilíndrica y el segundo de forma ojalada para compensar variaciones de distancia entre ejes. El conjunto de n segmentos es accionado por medio del movimiento de los mencionados ejes

4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

articuladores (en número de $n+1$) los cuales describen trayectorias manteniendo un mismo desfase entre ejes de cada segmento.

Cada segmento llevará dos orificios para alojar a los ejes que lo accionan.

1. El primer orificio de forma cilíndrica: únicamente permitirá un movimiento relativo de rotación entre el eje y el segmento.
2. El segundo alojamiento, de forma ojalada: permite, además del movimiento relativo de giro del correspondiente eje, un segundo movimiento relativo de traslación de dicho eje según una dirección paralela al segmento. Su forma ojalada sirve para compensar la variación de distancia entre ejes contiguos.

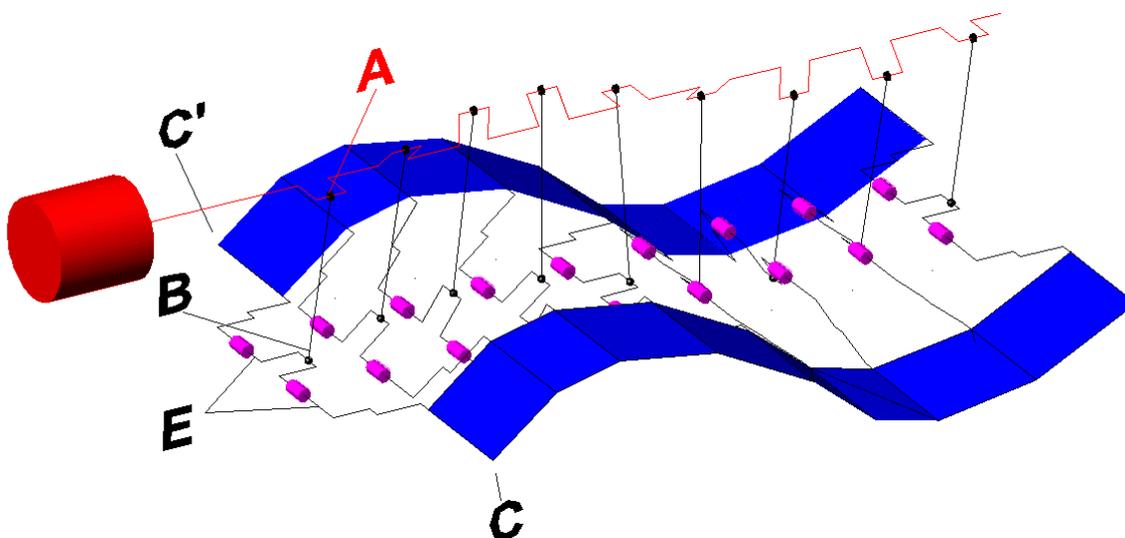
El resultado final es el de una superficie creada por una generatriz horizontal que se desplaza paralela a si misma siguiendo una directriz ondulada.

Este concepto de superficie ondulante articulada fue protegido mediante patente de invención con solicitud P200803079 de fecha 27/10/2008.

4.1.2.2.1. Accionada mediante excéntricas y ejes articuladores que describen movimientos de rotación

Se considera un nuevo mecanismo de conversión de movimiento mediante excéntricas en el cual los segmentos de membranas son accionados mediante unos ejes articuladores (C, C') a los que se les ha inducido un movimiento angular oscilatorio (Fig. 54).

Fig. 54 Superficies accionadas mediante ejes articuladores que describen movimientos de rotación



- A: excéntrica
- B: biela
- C', C: ejes articuladores de los segmentos, situados respectivamente a babor y a estribor
- E: eje, accionado por la biela B, transmite un movimiento regular de oscilación a las varillas articuladoras C, C'

Este mecanismo tiene las ventajas:

- Los ejes (E), que atravesarían el casco, tendrían un movimiento angular oscilante. Por tanto se podrían emplear sistemas de sellado del casco similares a los que se emplean convencionalmente en las salidas de los ejes de los barcos (bocinas).
- Es capaz de trabajar de modo reversible (de tal manera que, recibiendo un caudal de fluido en la membrana, genere un par motor) en condiciones óptimas: los segmentos de la forma de onda reciben la fuerza de presión procedente del fluido y esta fuerza es multiplicada mediante el brazo de palanca y convertida en un par motor.

4.1.2.2.2. Accionada mediante excéntricas y ejes articuladores que describen movimientos armónicos lineales.

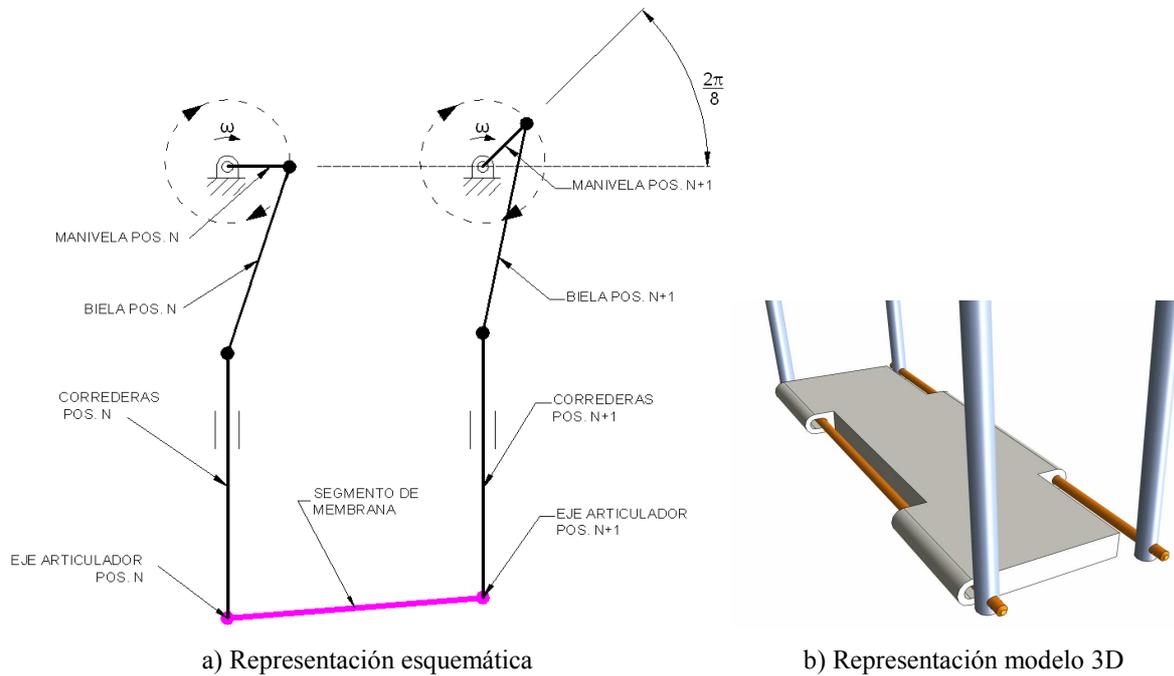
Se concibe y se modela un nuevo mecanismo que, a la postre, sería el escogido para fabricar en taller (Figs. 55, 56).

En este concepto de mecanismo los ejes articuladores de la membrana trabajan describiendo movimientos oscilatorios lineales, desfasados entre sí, de tal manera que para generar una forma de onda completa, aproximadamente sinusoidal, de longitud de onda λ y amplitud a mediante una superficie ondulante constituida por n segmentos.:

- Los ejes articuladores deberán disponerse de tal manera que sus trayectorias estén separadas entre sí una distancia de λ/n
- El movimiento armónico lineal de dichos ejes deberá tener una amplitud a igual a la amplitud de la forma de onda.
- El desfase entre movimientos de ejes contiguos deberá ser de $2\pi/n$. El último eje estará en fase con el primero.

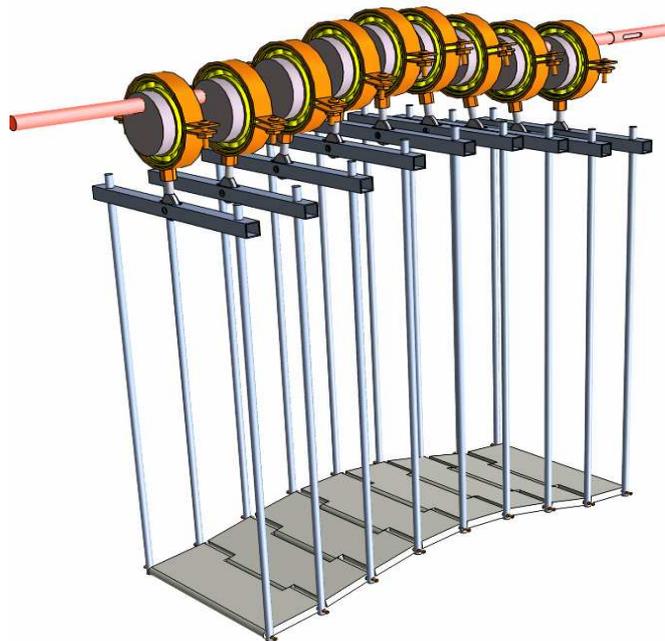
4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

Fig. 55 Accionamiento de un segmento de aleta mediante dos sistemas manivela-biela – corredera



Cada segmento es accionado por medio de dos pares de correderas, de tal manera que cada par de correderas (accionado a su vez en un *sistema manivela-biela-corredera*) transmite un movimiento vertical de vaivén a uno de los ejes articuladores del segmento de membrana y dos ejes articuladores conforman el soporte físico de un segmento de membrana.

Fig. 56 Aleta, con modo de desplazamiento anguiliforme, accionada por excéntricas y correderas con movimiento rectilíneo vertical.



La principal ventaja de esta forma escogida para fabricar el propulsor es la posibilidad de ejecución en taller con medios propios.

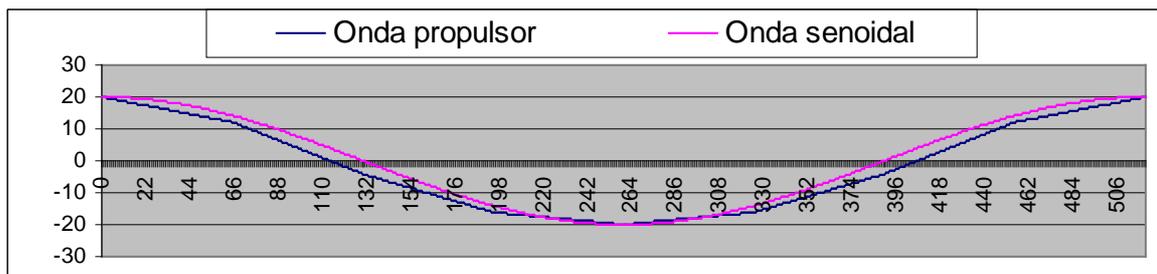
Las desventajas de este modelo van a ser:

- a) La necesidad de diseñar un sistema de sellado de los orificios por los cuales las correderas atraviesan el casco de acero en su movimiento armónico lineal (es necesario preservar de la humedad los rodamientos lineales que van a guiar el movimiento de dichos vástagos)
- b) Se dificulta la reversibilidad del mecanismo con respecto a la filosofía de diseño plasmada en la imagen

Principales características de la forma de onda diseñada:

- Longitud de onda: 520 mm
- Anchura: 200 mm
- Amplitud: ± 20 mm
- N° de segmentos: 8 (9 excéntricas)
- Material de fabricación: nylon (plancha de 10 mm)
- Frecuencia máxima: 1500 ciclos por minuto

Fig. 57 Gráfica comparativa entre la forma de onda generada por el prototipo y una forma de onda sinusoidal.



4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

4. 2 Análisis cinemático del mecanismo propuesto

4.2.1. Introducción

La meta principal del análisis cinemático es la determinación de las velocidades y aceleraciones de todas las partes móviles del conjunto.

Para calcular éstas se deben encontrar las posiciones de todos los elementos del mecanismo (sus eslabones) para cada instante del movimiento de entrada y luego derivar las ecuaciones de posición con respecto al tiempo para obtener las velocidades; las cuales a su vez también se derivan con objeto de obtener las aceleraciones.

4.2.2. Metodología

Se expone a continuación un análisis cinemático del comportamiento de un segmento de la forma de onda a generar en función de diversos parámetros constructivos: longitud de bielas, número de segmentos, etc.

Para estudiar el movimiento de un segmento de membrana se modeliza el mecanismo de accionamiento de éste por medio de un doble eslabonamiento manivela - corredera.

4.2.2.1. Expresiones de la posición así como de la longitud del ‘segmento de forma de onda’ en el doble eslabonamiento manivela- biela-corredera, 1 grado de libertad

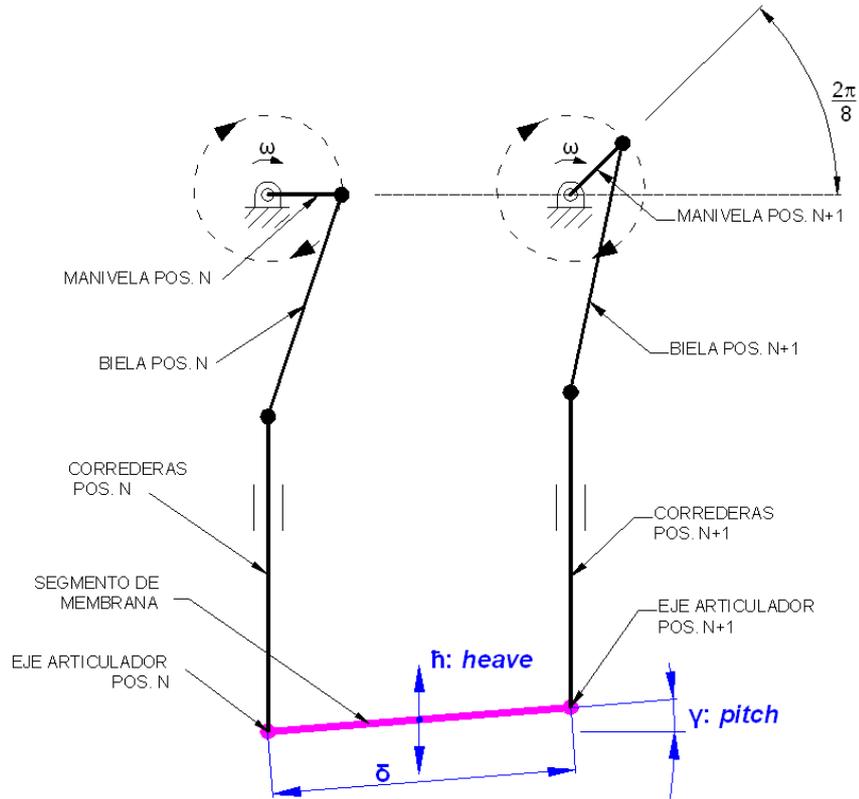
En la figura se esquematiza un segmento de membrana ondulante accionado por dos eslabonamientos manivela – corredera cuyos movimientos están desfasados entre sí un octavo de periodo

Se denomina ‘ γ ’ al valor del ángulo que forma el ‘segmento de membrana’ objeto de estudio con el plano horizontal (pitch).

Se denomina h al valor del desplazamiento vertical del centro de gravedad del segmento objeto de estudio.

Se denomina ‘ δ ’ al valor de la distancia entre cada dos ejes horizontales entre los que se articula cada segmento de membrana

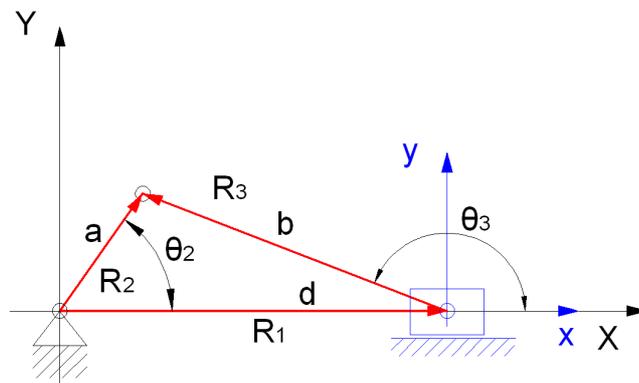
Fig. 58 Esquema de accionamiento de un segmento de membrana



4.2.2.1.1. Expresión de la posición vertical de una corredera en el *eslabonamiento de tres barras manivela-corredera*

Para cualquier eslabonamiento con un grado de libertad, sólo se necesita un parámetro para definir completamente las posiciones de todos los eslabones. El parámetro que normalmente se escoge es el ángulo del eslabón de entrada. Éste se muestra como θ_2 en las fig.

Fig. 59 Lazo vectorial de vectores de posición para un *eslabonamiento de tres barras manivela- biela- corredera*



4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

La cadena con corrimiento que se considerará para este caso puede ser representada por sólo tres vectores de posición: R_1 , R_2 y R_3

- R_1 , vector de módulo variable y dirección constante representa la posición de la corredera.
- R_2 , vector de módulo fijo, representa la posición de la manivela
- R_3 , vector de posición del acoplador, se ubica con su principio en la corredera y de este modo define su ángulo θ_3 en el punto B.

Esta disposición particular de vectores de posición conduce a una ecuación de lazo vectorial:

$$\overline{R_2} - \overline{R_3} - \overline{R_1} = 0 \quad (27)$$

Si los módulos de los vectores (longitudes de eslabón) se representan por a , b , c , como se indica, pueden sustituirse los vectores por sus equivalentes de números complejos:

$$ae^{j\theta_2} - be^{j\theta_3} - de^{j\theta_1} = 0 \quad (28)$$

Introduciendo en (33) los equivalentes de Euler y separando componentes real e imaginaria:

$$\text{parte real:} \quad a \cos \theta_2 - \cos \theta_3 - d = 0 \quad (29)$$

$$\text{parte imaginaria:} \quad a \sin \theta_2 - b \sin \theta_3 = 0 \quad (30)$$

Se resuelven las ecuaciones para determinar la incógnita de la longitud d del eslabón correspondiente a la posición de la corredera en función del ángulo θ_2 de posición de la manivela. Por tanto:

$$\theta_3 = -\arcsin((a/b)\sin \theta_2) + \pi \quad (31)$$

$$d = a \cos \theta_2 - b \cos \theta_3 \quad (32)$$

4.2.2.1.2. Expresión de la posición del ‘segmento de forma de onda’: ángulo que forma con el plano horizontal (pitch)

Se denomina con el símbolo ‘ α ’ al ángulo de desfase entre dos manivelas consecutivas. Se puede extraer que $\alpha = 360/(n-1)$. Donde ‘ n ’ es el número de manivelas del mecanismo de transmisión.

Se denomina con el símbolo ‘q’ a la distancia entre dos manivelas dispuestas de forma consecutiva sobre el eje común que las soporta

Atendiendo a las ecuaciones (36) y (37). Para la primera corredera:

$$d_1 = a \cos \theta_2 - b \cos \theta_{31} \quad (33)$$

$$\text{donde } \theta_{31} = -\arcsin((a/b)\sin \theta_2) + \pi \quad (34)$$

Para la segunda corredera, que es actuada por una manivela que se mueve con un desfase de α grados con respecto a la anterior:

$$d_2 = a \cos(\theta_2 - \alpha) - b \cos \theta_{32} \quad (35)$$

$$\text{donde } \theta_{32} = -\arcsin((a/b)\sin(\theta_2 - \alpha)) + \pi \quad (36)$$

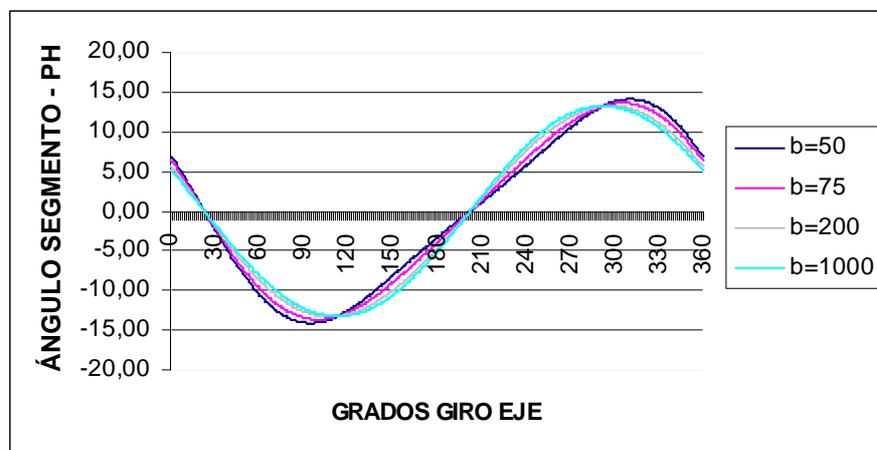
Por tanto, se obtiene:

‘ γ ’ valor del ángulo que forma el ‘segmento de membrana’ objeto de estudio con el plano horizontal (pitch), de la expresión:

$$\gamma = \arctg((d_1 - d_2)/q) \quad (37)$$

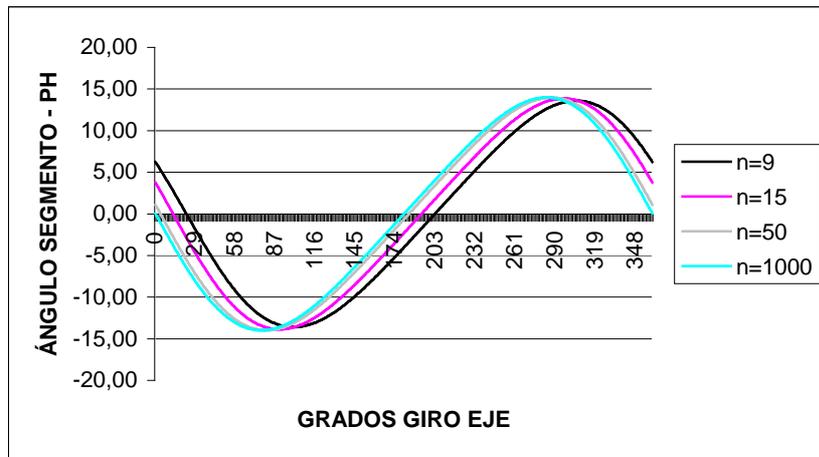
Representando las curvas $\gamma(\theta_2)$ (fig. 53), que relacionan el ángulo que forma cada segmento de membrana respecto al plano horizontal con el ángulo de giro del eje para distintos valores de longitud de “biela”, se observa que cuanto mayor es esta longitud más se aproxima esta función a una forma senoidal y por consiguiente el movimiento de oscilación del segmento es más “suave”

Fig. 60 Posición de segmento de membrana (pitch) en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de b (longitud de biela). (a=20 mm, n = 8 segmentos, $\lambda = 520$ mm)



4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

Fig. 61 Posición de segmento de membrana (pitch) en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de n (número de segmentos). (a=20 mm, b = 75 mm, λ = 520 mm)



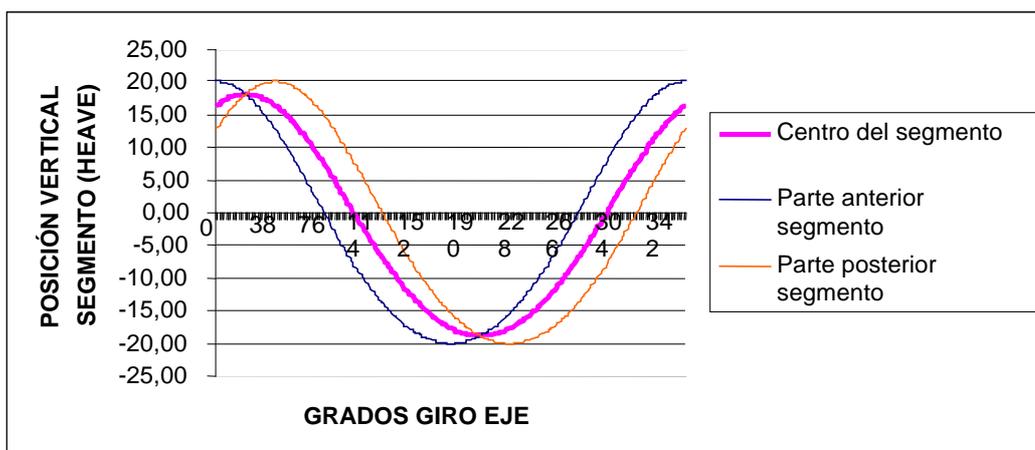
Asimismo, de la fig. 54 cabe deducir que el incremento del número de segmentos de membrana, manteniendo invariable la longitud de onda, longitud de manivela y longitud de biela no implica cambios significativos en la evolución de la posición.

4.2.2.1.3. Expresión de la posición del ‘segmento de forma de onda’: desplazamiento vertical de su centro geométrico (heave)

h: valor (mm) de la posición del segmento objeto de estudio en su movimiento vertical (heave)

$$\hat{h} = (d_1 + d_2) / 2 \quad (38)$$

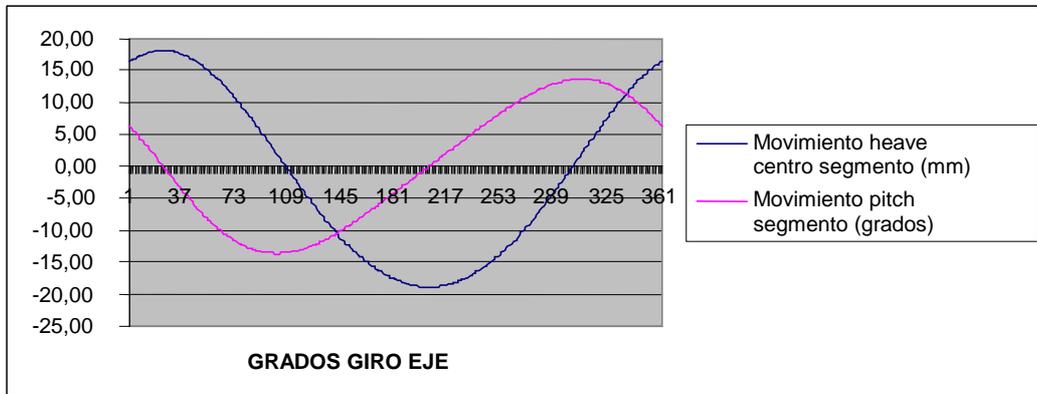
Fig. 62 Posición de segmento de membrana (heave) en función del ángulo de giro del eje para un valor de longitud de biela de: b=20 mm)



El incremento de la longitud de la biela no afecta a la amplitud del movimiento ascendente – descendente del segmento de membrana. Representando las curvas de movimiento del

segmento de aleta en una misma gráfica (fig. 69) se observa un cierto desfase entre ambas. Mediante cálculos se obtiene un valor próximo a 90°.

Fig. 63 Desfase entre movimientos de *pitch* y *heave* de un segmento de membrana



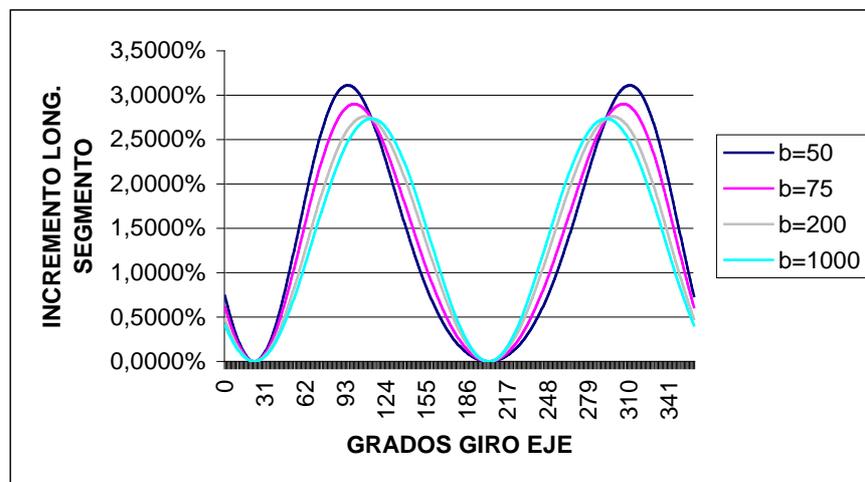
4.2.2.1.4. Expresión de la longitud del segmento de forma de onda

‘ δ ’: valor de la longitud del ‘segmento de membrana’ objeto de estudio:

$$\delta = \sqrt{(d_1 - d_2)^2 + q^2} \quad (39)$$

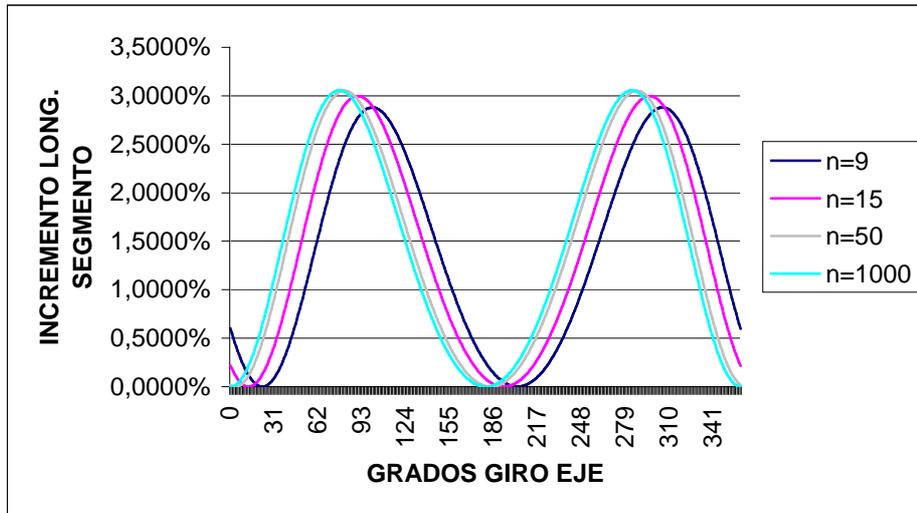
Representando la función $\delta(\theta_2)$ para diversos valores de b (fig. 57) (longitud de eslabón “seguidor”) se observa que a medida que esta última aumenta, el incremento de la longitud del segmento de membrana disminuye tendiendo asintóticamente a un cierto valor. Se observa también que en un giro completo del eje del mecanismo cada segmento de membrana experimenta dos elongaciones

Fig. 64 Incremento de longitud del segmento de membrana en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de b (longitud de biela). ($a=20$ mm, $n = 8$ segmentos, $\lambda = 520$ mm)



4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

Fig. 65 Incremento de longitud del segmento de membrana en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de n (número de segmentos). (a=20 mm, b = 75 mm, λ = 520 mm)



Representando la función $\delta(\theta_2)$ para diversos valores de n (fig. 58) (nº de segmentos de membrana) se observa que, a medida que aumenta el número de segmentos en los que se divide la membrana ondulatoria el incremento relativo de longitud de segmento también aumenta, tendiendo asintóticamente a un cierto valor.

4.2.2.2. Expresión de la velocidad y aceleración angulares de un segmento de membrana accionado por dos correderas desfasadas entre sí un octavo de periodo.

4.2.2.2.1 Expresión de la velocidad de la corredera en el *eslabonamiento de tres barras manivela –biela– corredera*

Ecuación de lazo vectorial anteriormente obtenida:

$$ae^{j\theta_2} - be^{j\theta_3} - de^{j\theta_1} = 0 \quad (40)$$

Se deriva la expresión (14) con respecto al tiempo, manteniendo a, b, θ_1 constantes:

$$ja\omega_2 e^{j\theta_2} - jb\omega_3 e^{j\theta_3} - d' = 0 \quad (41)$$

El término d prima: (d') es la velocidad lineal de la corredera. Introduciendo los equivalentes de Euler en la ecuación (46) y separando partes real e imaginaria queda:

Parte real (componente x):

$$-a\omega_2 \sin \theta_2 + b\omega_3 \sin \theta_3 - d' = 0 \quad (42)$$

Parte imaginaria (componente y):

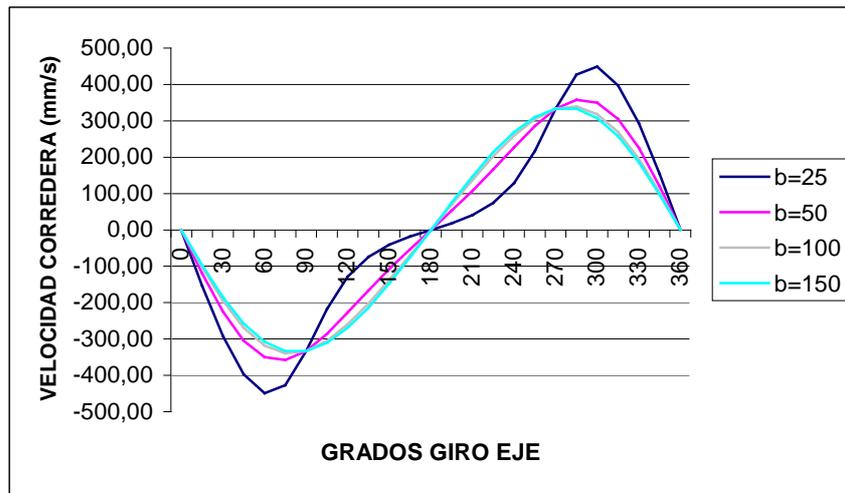
$$a\omega_2 \cos \theta_2 - b\omega_3 \cos \theta_3 = 0 \quad (43)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (47), (48):

$$\omega_3 = (a \cos \theta_2 / b \cos \theta_3)\omega_2 \quad (44)$$

$$d' = -a\omega_2 \sin \theta_2 + b\omega_3 \sin \theta_3 \quad (45)$$

Fig. 66 Velocidad instantánea de la corredera en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de longitud de biela. (a=20 mm, n = 8 segmentos, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)



4.2.2.2.2. Expresión de la aceleración de la corredera en el *eslabonamiento de tres barras manivela-biela - corredera*

Partiendo de la ecuación de velocidad anteriormente obtenida (50). Se deriva esta expresión con el fin de obtener la expresión de la aceleración y se elimina j^2 . Resulta:

$$(a\alpha_2 j e^{j\theta_2} - a\omega_2^2 e^{j\theta_2}) - (b\alpha_3 j e^{j\theta_3} - b\omega_3^2 e^{j\theta_3}) - d'' = 0 \quad (46)$$

Las dos incógnitas de la ecuación (34) son la aceleración angular del eslabón 3, esto es: α_3 y la aceleración lineal de la corredera: d'' . Para resolver este sistema se introduce la identidad de Euler y se separan las partes real e imaginaria.

Parte real

$$-a\alpha_2 \sin \theta_2 - a\omega_2^2 \cos \theta_2 + b\alpha_3 \sin \theta_3 + b\omega_3^2 \cos \theta_3 - d'' = 0 \quad (47)$$

Parte imaginaria

$$a\alpha_2 \cos \theta_2 - a\omega_2^2 \sin \theta_2 - b\alpha_3 \cos \theta_3 + b\omega_3^2 \sin \theta_3 = 0 \quad (48)$$

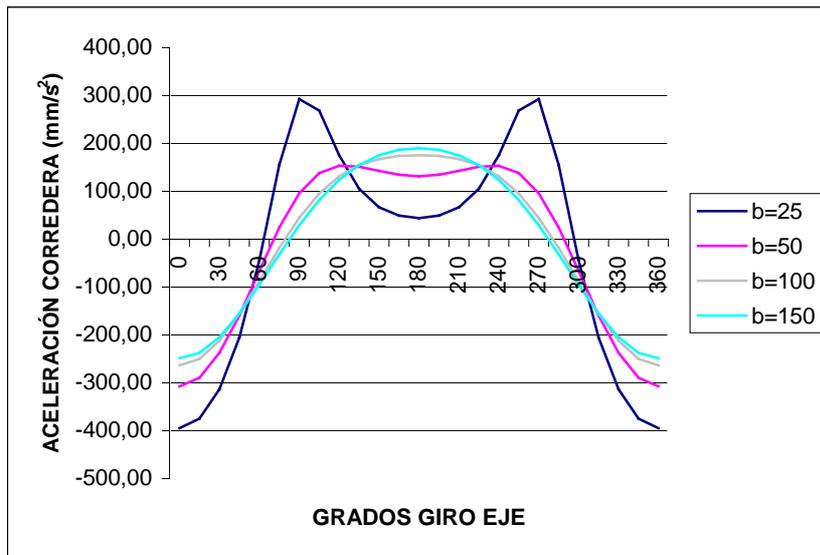
4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

Resolviendo el sistema de ecuaciones (52), (53):

$$\alpha_3 = \frac{(a\alpha_2 \cos \theta_2 - a\omega_2^2 \sin \theta_2 + b\omega_3^2 \cos \theta_3)}{b \cos \theta_3} \quad (49)$$

$$d'' = -a\alpha_2 \sin \theta_2 - a\omega_2^2 \cos \theta_2 + b\alpha_3 \sin \theta_3 + b\omega_3^2 \cos \theta_3 \quad (50)$$

Fig. 67 Aceleración de la corredera en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de longitud de biela. (a=20 mm, n = 8 segmentos, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)



Se observa que el aumento de la longitud de las bielas influye sobre la forma de la curva de aceleración angular suavizándola: esto es, atenuando las sobreaceleraciones (tirones o sacudidas) a las que se ven sometidas las correderas

4.2.2.2.3. Expresión de la velocidad angular de un segmento de membrana:

Partiendo de la ecuación (42), sustituyendo las expresiones de $d_1(\theta)$ y $d_2(\theta)$ y derivando con respecto de t se llega a:

$$\gamma' = \frac{-\left(\frac{a}{q}\right)\omega \sin \theta_{21} + \left(\frac{b}{q}\right)\sin \theta_{31}\theta'_{31} + \left(\frac{a}{q}\right)\omega \sin \theta_{22} - \left(\frac{b}{q}\right)\sin \theta_{32}\theta'_{32}}{1 + \left(\frac{(a \cos \theta_{21} - b \cos \theta_{31}) - (a \cos \theta_{22} - b \cos \theta_{32})}{q}\right)^2} \quad (51)$$

Fig. 68 Velocidad angular de un segmento en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de longitud de biela. (a=20 mm, n = 8 segmentos, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)

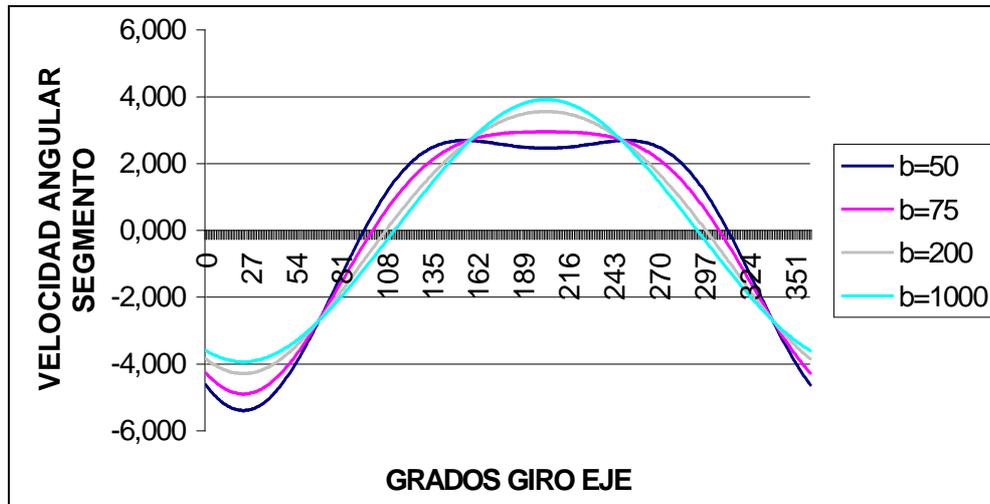
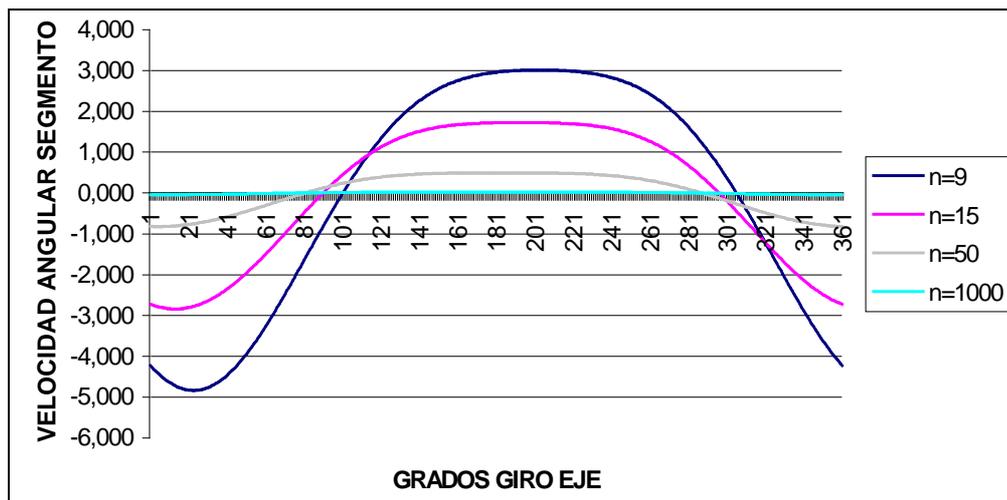


Fig. 69 Velocidad angular de un segmento en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de número de segmentos. (a=20 mm, b = 75 mm, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)



Claramente se observa que, con el aumento del número de segmentos disminuye la velocidad angular con la que trabaja cada segmento de membrana

4.2.2.2.4. Expresión de la aceleración angular de un segmento de membrana.

Llamando $f(\theta)$ al numerador de la anterior expresión (56), $g(\theta)$ al denominador y $g_1(\theta)$ a la expresión:

$$\frac{(a \cos \theta_{21} - b \cos \theta_{31}) - (a \cos \theta_{22} - b \cos \theta_{32})}{q} = g_1(\theta) \quad (52)$$

Derivando el numerador de la expresión (56):

4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

$$f'(\theta) = -\left(\frac{a}{q}\right)\omega^2 \cos \theta_{21} + \left(\frac{b}{q}\right)(\cos \theta_{31}\theta_{31}'' + \sin \theta_{31}\theta_{31}') + \left(\frac{a}{q}\right)\omega^2 \cos \theta_{22} - \left(\frac{b}{q}\right)(\cos \theta_{32}\theta_{32}'' + \sin \theta_{32}\theta_{32}') \quad (53)$$

$$g(\theta) = 2f(\theta)g_1(\theta) \quad (54)$$

Luego, derivando la expresión (56) e introduciendo las expresiones (57), (58) y (59):

$$\gamma'' = \frac{f'(\theta)g(\theta) - 2f^2(\theta)g_1(\theta)}{g^2(\theta)} \quad (55)$$

Fig. 70 Aceleración angular de un segmento en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de longitud de biela. (a=20 mm, n = 8 segmentos, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)

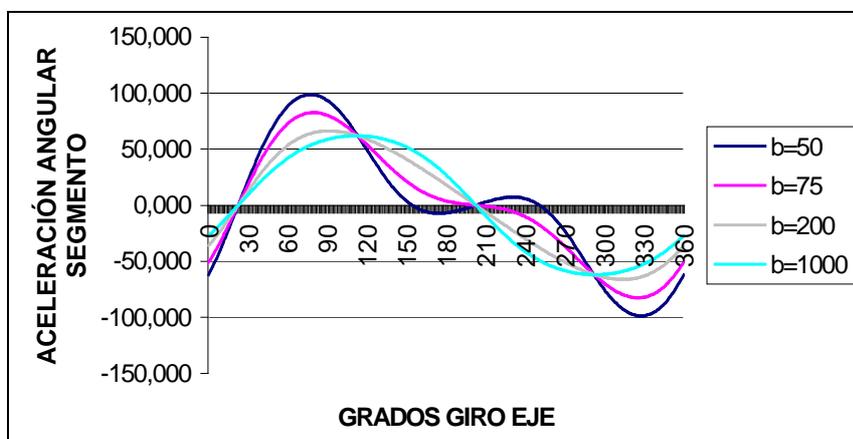
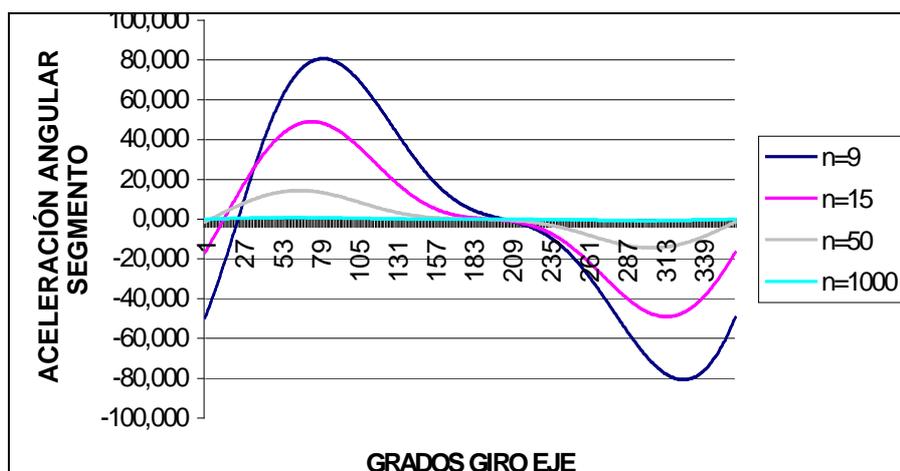


Fig. 71 Aceleración angular de un segmento en función del ángulo de giro del eje para diversos valores de número de segmentos. (a=20 mm, b = 75 mm, λ = 520 mm, ω₂= 1000 rpm)



De las figuras (63, 64) se puede observar que, tanto con el aumento del número de segmentos como con el aumento de la longitud de las bielas disminuye la aceleración

angular (y con ello los esfuerzos) a la que se ve expuesto cada segmento de membrana. Asimismo se detecta que estas variaciones también influyen sobre la forma de la curva de aceleración angular suavizándola: esto es, atenuando las sobreaceleraciones (tirones o sacudidas)

4.2.3. Conclusiones

Del análisis cinemático del mecanismo se extrae la conclusión de la conveniencia de incluir el mayor número de segmentos de membrana en una longitud de onda, así como de la mayor longitud posible de las bielas, tal como se deduce en los puntos anteriores.

Mediante este estudio ha sido posible extraer, tanto la expresión de la velocidad lineal de una corredera en función del ángulo de giro del eje motriz como la expresión de la velocidad angular de un segmento de membrana en función de este mismo ángulo de giro, ambas imprescindibles para elaborar la Función Definida por Usuario (UDF) que gobernará el movimiento del mallado dinámico del modelo CFD

El tipo de mecanismo escogido impone una longitud reducida de las manivelas (distancia entre el centro del eje de excéntricas y el centro del disco de las excéntricas), puesto que el incremento de esta distancia implica el incremento del diámetro del disco de excéntrica y por consiguiente del diámetro del rodamiento intermedio y con ello su anchura, peso, etc. Lo cual implica una reconsideración del diámetro del eje por motivos de resistencia mecánica y, de ser el caso, una nueva revisión de las dimensiones antes consideradas. Por tanto el artefacto diseñado lo es para longitud de manivela de 20mm (dando lugar por tanto a una onda de 40mm de amplitud) Podría escalararse para una amplitud de onda de 25mm sin otra modificación que la de las excéntricas. Para otras amplitudes de onda mayores sería preciso rediseñar también el eje.

Se decide construir la superficie ondulante a partir de una serie de segmentos rígidos convenientemente diseñados, evitando el empleo de un material elástico que trabaje elongándose, una vez que se desprende de este análisis que cada segmento de superficie ondulante se estira dos veces por cada revolución del eje.

4. CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

4.3 Diseño de la excéntrica

De acuerdo con lo anteriormente expuesto la amplitud de la onda (20 mm) es la que va a imponer la distancia entre el eje de excéntricas y el centro del disco de la excéntrica.

Por tanto se decide el diseño de un disco de excéntrica (1) del menor tamaño posible para minimizar las cargas de inercia en el eje y se mecaniza, en el torno del taller mecánico de la EUP, a partir de un tocho de redondo de teflon de 70 mm de diámetro. La superficie exterior del disco que va a trabajar en contacto con la cara interna del rodamiento fue mecanizada con un diámetro mayor que el interno del rodamiento para evitar deslizamientos y de esta forma asegurar el correcto funcionamiento del conjunto. Por tanto los rodamientos hubieron de ser montados a presión con ayuda de un tornillo de banco de mecánico.

Se inserta entre disco y collar de excéntrica un rodamiento rígido a bolas (2) ref. 6012-2RZ fab. FAG, de diámetro int/ext: 60/95 mm, ancho de 18 mm con obturaciones de caucho reforzadas con chapa de acero a ambos lados del rodamiento.

Se emplea un anillo elástico de seguridad para ejes (DIN 471) para prevenir el desplazamiento lateral del rodamiento sobre el disco de la excéntrica (3)

Se emplea como collar de excéntrica una abrazadera de acero galvanizado de 90 mm de diámetro y 20 mm de ancho con conexión a varilla roscada mediante tuerca de M8 (4).

Para transmitir el movimiento de rotación del eje a las excéntricas se dimensionan lenguetas de ajuste (chavetas) (5) según norma DIN-6885 y se mecanizan en el taller mecánico de la EUP a partir de pletina de inox (AISI 304) 30x6 mm.

Se emplea como barra transmisora del movimiento de la excéntrica una cabeza de rótula ref. GAR 8-UK con rosca macho M8 fab. FAG (6)

Se fabrican en taller los balancines horizontales (7) a partir de tubo cuadrado de inox (AISI 304) 15x15x1 mm

Para transmisión del movimiento a los segmentos de membrana se emplean unos vástagos (8) contruidos a partir de ejes de precisión de inox templado (AISI 304) ref W8x500mm de fab FAG. Debido a la elevada dureza de este material hubo de subcontratarse el mecanizado de los mismos.

El movimiento lineal de los vástagos fue logrado gracias a la inclusión de rodamientos lineales (9) ref. KGHK08-B-PP-AS fab FAG

Para construir los ejes articuladores de los segmentos de membrana (10) se empló redondo de inox (AISI 316) de 4 mm de diámetro. En los extremos de los mismos fueron realizados taladros de diámetro 1,5 mm con objeto de alojar a los pasadores de aletas (DIN 94) que impidan su desplazamiento axial.

Los rodamientos lineales van montados sobre placas de metacrilato de 10 mm de espesor (11). Estas piezas fueron cortadas en el Taller de Láser del CIT de la UDC

Fig. 72 Síntesis del sistema biela - corredera

