

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo realizado en la Escuela Politécnica Superior de Ferrol me ha permitido aprovechar una experiencia de aprendizaje muy gratificante, pudiendo conocer de cerca un importante sector en la comarca. La motivación de este proyecto presenta una importante oportunidad para la modernización en ciertas áreas de la industria naval y abriendo un apasionante camino en el desarrollo de estas herramientas.

En primer lugar, quiero dar mi mayor agradecimiento a mi tutor Daniel Dopico Dopico por haber trabajado durante estos meses conmigo. Su disposición y su ayuda han sido una gran motivación para llevar a cabo este trabajo. Ha sido un placer poder trabajar durante este tiempo a su lado, por ello quiero agradecer de forma especial el apoyo que he recibido y el constante ánimo para mejorar.

También quiero agradecer a Ana Álvarez García su importante ayuda. Sus explicaciones han sido vitales para poder llevar a cabo la fase de diseño y conocer en detalle los procedimientos y herramientas empleadas en esta disciplina.

De manera muy especial, agradezco a mi familia todo el apoyo durante estos años. Especialmente mis padres, quienes me han ayudado en todo momento a seguir y esquivar las dificultades que se han ido presentando. Todo lo que pueda llegar a lograr es gracias a su esfuerzo. No quiero olvidarme de Alejandra, siendo su apoyo una importante fuente de ánimo.

A todos los que me habéis ayudado, muchas gracias.

Índice

Índice

1. Introducción	1-1
1.1. Antecedentes	1-2
1.2. Motivación	1-3
2. Desarrollo del plano de formas del buque y sistema de fondeo	2-1
2.1. Plano de formas del buque	2-2
2.2. Sistema de fondeo	2-3
2.2.1. Parámetros elegidos para el sistema de fondeo	2-5
2.3. Modelo de CAD del buque	2-7
3. La dinámica de sistemas multicuerpo	3-1
3.1. Modelización en coordenadas mixtas	3-2
3.1.1. Las coordenadas naturales	3-2
3.1.2. Las coordenadas relativas	3-2
3.1.3. Las coordenadas mixtas	3-3
3.2. El problema cinemático: problema de posición y velocidad inicial	3-4
3.2.1. El problema de posición inicial	3-4
3.2.2. El problema de velocidad inicial	3-5
3.3. El problema dinámico: ecuaciones de la dinámica	3-6
3.3.1. Introducción a la resolución de problemas dinámicos	3-6
3.3.2. El primer problema dinámico: el problema de aceleración inicial	3-7
3.3.3. El problema dinámico en tiempo real: formulación ALI3-P	3-9
3.4. Modelización elegida para el sistema de fondeo	3-12
3.4.1. Definición del buque	3-14
3.4.2. Definición de sólidos del sistema de fondeo	3-14
3.4.3. Grados de libertad	3-18
3.4.4. El vector de variables	3-19
3.4.5. Fuerzas	3-19
4. SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques	4-1

5. Simulación de la maniobra de anclas del buque diseñado	5-1
5.1. Configuración de la simulación	5-2
5.2. Resultados de la simulación	5-7
6. Fabricación y simulación del modelo a escala	6-1
7. Conclusiones	7-1
8. Bibliografía	8-1
9. ANEJOS	9-1
9.1. Anejo I: Plano de formas del buque	9-1

Índice de figuras

<i>Figura 2-1. Referencias de un buque</i>	<i>2-2</i>
<i>Figura 2-2. Planos de un buque</i>	<i>2-2</i>
<i>Figura 2-3. Planos de formas.....</i>	<i>2-7</i>
<i>Figura 2-4. Planos de formas desplazados</i>	<i>2-8</i>
<i>Figura 2-5. Modelado del casco</i>	<i>2-8</i>
<i>Figura 2-6. Modelado de proa</i>	<i>2-9</i>
<i>Figura 2-7. Trazado de la brusca</i>	<i>2-11</i>
<i>Figura 2-8. Divisiones para cálculo de brusca</i>	<i>2-12</i>
<i>Figura 2-9. Modelado de la cubierta</i>	<i>2-13</i>
<i>Figura 2-10. Modelado del escobén</i>	<i>2-14</i>
<i>Figura 2-11. Grillete, caña y ancla</i>	<i>2-14</i>
<i>Figura 3-1. Restricciones para los eslabones</i>	<i>3-14</i>
<i>Figura 3-2. Restricciones para el grillete y la caña</i>	<i>3-16</i>
<i>Figura 3-3. Restricciones para la caña y las uñas del ancla</i>	<i>3-17</i>
<i>Figura 3-4. Contacto normal</i>	<i>3-20</i>
<i>Figura 3-5. Contacto tangencial</i>	<i>3-21</i>
<i>Figura 3-6. Ángulo del ancla con la caña</i>	<i>3-24</i>
<i>Figura 4-1. Configuración de la simulación</i>	<i>4-3</i>
<i>Figura 4-2. Configuración del buque</i>	<i>4-5</i>
<i>Figura 4-3. Cálculo de las características del elemento</i>	<i>4-6</i>
<i>Figura 4-4. Configuración de la caña</i>	<i>4-7</i>
<i>Figura 4-5. Configuración del ancla</i>	<i>4-7</i>
<i>Figura 4-6. Configuración de la cadena</i>	<i>4-9</i>
<i>Figura 4-7. Configuración del grillete y el molinete</i>	<i>4-9</i>
<i>Figura 4-8. Fuerzas representadas en la simulación</i>	<i>4-10</i>
<i>Figura 4-9. Estructura de malla</i>	<i>4-11</i>
<i>Figura 5-1. Parámetros de simulación</i>	<i>5-2</i>
<i>Figura 5-2. Datos del buque</i>	<i>5-3</i>
<i>Figura 5-3. Datos caña</i>	<i>5-4</i>
<i>Figura 5-4. Datos ancla</i>	<i>5-5</i>
<i>Figura 5-5. Datos de la cadena</i>	<i>5-6</i>
<i>Figura 5-6. Datos del grillete y el molinete</i>	<i>5-7</i>
<i>Figura 5-7. Posición inicial</i>	<i>5-8</i>
<i>Figura 5-8. Posición de equilibrio</i>	<i>5-8</i>

<i>Figura 5-9. Cuadro de control de la simulación</i>	5-9
<i>Figura 5-10. Fuerzas en la simulación</i>	5-9
<i>Figura 5-11. Evolución de la simulación</i>	5-10
<i>Figura 5-12. Posición de estiba</i>	5-11
<i>Figura 5-13. Posición ancla</i>	5-12
<i>Figura 5-14. Velocidad de tiro</i>	5-13
<i>Figura 5-15. Recogida cadena</i>	5-13
<i>Figura 5-16. Fuerza del molinete</i>	5-14
<i>Figura 6-1. Modelo a escala 1:30</i>	6-2

Índice de tablas.

<i>Tabla 2-1. Características del buque.....</i>	<i>2-1</i>
<i>Tabla 2-2. Tabla Numeral de Equipo.....</i>	<i>2-6</i>
<i>Tabla 3-1 Balance de grados de libertad.</i>	<i>3-18</i>

Capítulo 1

Introducción

1. Introducción

El objetivo del presente proyecto es la validación del software SIMULANCLA, una novedosa tecnología que evita la necesidad de modelar el sistema de fondeo y todos los equipos que intervienen en esta maniobra, que permite el diseño de cascos de buques de grandes dimensiones.

Las maniobras de fondeo en buques de gran tamaño entrañan muchos riesgos, tanto en el propio proceso de fondeo sobre el fondo marino como en la recogida de las cadenas y las anclas, que obligatoriamente deben quedar perfectamente estibadas en el casco sin que se produzcan situaciones de inestabilidad o atascos de las mismas antes de llegar a una estiba satisfactoria. El diseño de la zona del casco del buque sobre la que debe acomodarse el ancla en el proceso de estiba no es en absoluto trivial. Existen dos sistemas distintos en los buques objeto de esta investigación, el nicho y la regola, con formas geométricas complejas y especialmente diseñadas para este propósito.

Hasta hace unos años, el estudio del sistema de fondeo de un buque se realizaba mediante el uso de maquetas, siendo costosas en tiempo y materiales. Además, limitan el estudio por los recursos necesarios y solamente ofrecen una aproximación general del comportamiento real. Con el uso de este software, se busca simplificar este análisis, permitiendo un estudio más cercano a la realidad, fiable y con unos tiempos de ejecución más rápidos.

El software se ha desarrollado durante los últimos seis años y facilita a los ingenieros del astillero el diseño geométrico de la regola o nicho del buque, de tal forma que la maniobra para levar el ancla se lleve a cabo de manera satisfactoria, así como la elección de los eslabones que deben componer la cadena y todos los elementos mecánicos implicados en las maniobras.



1.1. Antecedentes

Hasta hace unos años, se fabricaba, para cada diseño nuevo de buque que había que desarrollar, una maqueta de madera que representaba la maniobra de fondeo a escala 1:10. Estas maquetas son costosas en tiempo y no proporcionan la fiabilidad requerida, puesto que ni la escala ni los materiales en que están hechas son los reales, de modo que permiten sólo una evaluación cualitativa y aproximada de la bondad de la solución de diseño propuesta.

La fabricación de una de estas maquetas supone aproximadamente 1500 horas de trabajo y la implicación de diversos departamentos.

La nueva tecnología para el diseño de todos los elementos que intervienen en el proceso de fondeo supone un cambio de paradigma con respecto a la metodología empleada hasta la fecha en los astilleros, basada en las citadas maquetas de madera a escala del casco, cadena, ancla y de todos los sistemas que intervienen en el proceso de fondeo y leva de anclas.

Hay diversos factores que se deben tomar en consideración para el diseño, como las distintas posiciones en las que se puede encontrar el ancla en el momento del izado y el posible balanceo y/o inclinación del buque durante el mismo.

Asimismo, hay que asegurarse de que no se bloquea el mecanismo cuando el contacto entre el ancla y el casco se produce en una posición desfavorable.

El diseño debe asegurar que no se produzca el bloqueo del ancla durante la maniobra y que ésta adopte la posición esperada en el casco del buque cuando esté completamente recogida.

El software desarrollado permite simular, con gran detalle, la dinámica de las maniobras de leva de anclas, basándose en las técnicas de simulación de sistemas multicuerpo.

1.2. Motivación

Con el fin de validar la maniobra de fondeo de un buque, el software SIMULANCLA va a permitir realizar una simulación completa y detallada sin la necesidad de disponer de una maqueta para comprobar la maniobra en cuestión. Gracias al software, será posible definir la maniobra con mayor similitud a la situación real.

El empleo de una maqueta sólo permite una aproximación de la maniobra real, pues el empleo de otros materiales y una escala distintos a los reales, aportan una evaluación cualitativa que solamente nos puede acercar a una idea del comportamiento real de los elementos que intervienen en el proceso.

Sin embargo, el software SIMULANCLA permite realizar un estudio más completo, pudiendo analizar la dinámica de la maniobra, así como visualizar la maniobra como si de una maqueta se tratase, con la ventaja de poder conocer diferentes datos en tiempo de simulación.

De este modo, será posible conocer con una mayor exactitud el sistema de fondeo de un buque, pudiendo comparar distintos modelos y comprobar que configuraciones se adaptan mejor a los requerimientos del equipo técnico. Todo esto sería muy difícil de materializar con el empleo de maquetas, pues requeriría de una inversión económica y horaria muy extensa.

El desarrollo de este software además ha reducido el plazo necesario desde que se dispone de la estructura de la zona de proa hasta obtener las formas definitivas de la regala, nicho, piezas fundidas necesarias, etc., así como la realización de modificaciones de manera fácil y rápida que permiten optimizar las maniobras.

Capítulo 2

Desarrollo del plano de formas del buque y sistema de fondeo

2. Desarrollo del plano de formas del buque y sistema de fondeo

Con el fin de realizar la simulación de la maniobra con el software SIMULANCLA, primero se desarrollará el modelo del buque, así como todos los componentes del sistema de fondeo necesarios para la simulación.

Se propone para esta maniobra, un buque de apoyo a plataformas eólicas offshore. Las características principales del buque se pueden observar a continuación:

<u>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES:</u>	
ESLORA TOTAL	LOA = 176.10 m
ESLORA ENTRE PERPENDICULARES	LPP = 169.93 m
LENGHT OF WL AT 85% OF DEPTH = (11.90 m)	175.57 m
MANGA TRAZADO	B = 29.80 m
PUNTAL TRAZADO	D = 14.00 m
CALADO ESCANTILLONADO	T = 9.90 m

Tabla 2-1. Características del buque

El punto de partida para realizar el modelado, será el plano de formas que define la geometría del buque propuesto. El plano de formas es un plano fundamental que nos muestra las formas definitivas del buque. Se puede visualizar en el Anejo I: Plano de formas del buque.

A partir de este plano de formas se generan las curvas que determinan el buque. Para ello habrá que ubicar las distintas curvas en el espacio, de tal manera que se ajusten a lo representado en el plano. Estas curvas serán la base para generar la superficie del buque.

Una vez generado el casco se obtendrá el modelo CAD del buque, que posteriormente habrá que afinar para obtener el modelo final que será empleado en la simulación.



Por último, se realizará el modelado de los distintos elementos que van a participar en la simulación.

2.1. Plano de formas del buque

Generalmente los buques se definen por las dimensiones del prisma regular en el que está contenido. La longitud del mismo se denominará eslora, el ancho será la manga y el alto se conoce como puntal. Al tratarse de un cuerpo móvil, considerando un observador en el centro del buque, se denomina proa al extremo situado ante él, popa al extremo tras él, babor al lado que está a su izquierda y estribor al lado que está a su derecha.



Figura 2-1. Referencias de un buque

Para definir la geometría del buque se definen el plano base, que representa la vista en planta; el plano transversal en la sección media, quedando a la izquierda las líneas de popa y a la derecha las líneas de proa; y el plano longitudinal por la línea de crujía, es decir, la línea que pasando por la popa y la proa divide el barco en dos bandas iguales.

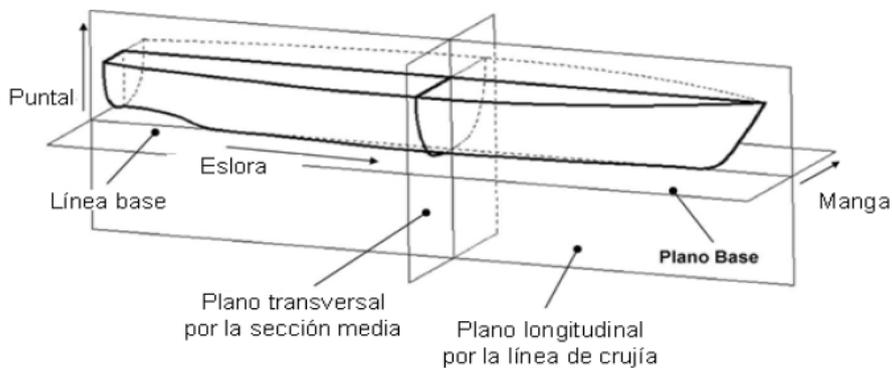


Figura 2-2. Planos de un buque



A partir de estos planos se determinan las siguientes secciones:

- Las paralelas al plano de base se denominan líneas de agua, siendo la línea cero la línea de base o línea de agua.
- Las paralelas a los planos de los extremos de proa y popa, perpendiculares al plano base, se denominan cuadernas, empezando el cero por la perpendicular de popa. Desde el cero hasta popa se enumera con números negativos.
- Las paralelas al plano longitudinal y perpendiculares a los otros planos, se denominan secciones longitudinales, siendo uno la más próxima al plano longitudinal que pasa por crujía. El plano diametral, o sección media, será el que divide el buque en dos bandas iguales.

De este modo, el plano de formas está compuesto por las líneas de intersección de los planos de las secciones, tanto horizontales, transversales y longitudinales, descritas en el párrafo anterior; con la superficie exterior del buque, representadas en los tres planos de proyección.

El procedimiento a llevar a cabo consiste en la translación de las formas del buque. Para ello se tomarán las curvas del plano de formas, se girarán y se colocarán en un punto de origen común. Este origen se encontrará en la intersección de la perpendicular de popa y de la línea de base. Posteriormente se acomodará cada una de estas curvas en su sitio, correspondiendo a la distancia obtenida al dividir la eslora con perpendiculares en 20 partes iguales, para construir una matriz de curvas en tres dimensiones. Con esta matriz se va a generar la superficie del buque. Una vez obtenida la superficie, se procederá a refinar la misma, en términos navales se denomina alisar las formas, para lograr que esta sea lo más aerodinámica posible.

2.2. Sistema de fondeo

El sistema de fondeo de un buque es el encargado de inmovilizar el mismo y de separarlo de la acción de las corrientes y el viento mediante elementos capaces de fijarse en el fondo del agua.



Esta serie de elementos forman parte del buque y van unidos a él. Aunque puede incluir más elementos, las partes fundamentales de un sistema de fondeo son las siguientes:

- Anclas
- Cadenas
- Molinete
- Escobén
- Estopor
- Tubos de las cadenas
- Caja de cadenas

El elemento principal es el ancla, encargado de fondear el buque por la acción de su propio peso y por sus uñas. Funciona de manera que, si es sometida a una fuerza paralela al fondo del agua, esta tiende a clavarse en el mismo. Para ello será necesario que el buque conserve una pequeña velocidad. Están fabricadas en hierro o acero y se unen al buque mediante un cabo o cadena.

En cuanto a las cadenas, se ha ido generalizando el uso de cadenas de acero. En estas se pueden distinguir los siguientes elementos: grillete de ancla, eslabón final, eslabón grande, eslabón giratorio, eslabón ordinario y eslabón de unión. Haciendo referencia a los tipos de cadenas, pueden ser con conrete o sin conrete. El conrete es la pieza que se coloca en el interior del eslabón en sentido del eje menor para evitar su deformación cuando está trabajando a tracción. Además, los eslabones deben ser normalizados y estandarizados para una mayor facilidad de sustitución cuando sea necesario.

El molinete es el elemento que se encarga de elevar el ancla del buque. Éste gira sobre un eje horizontal provocando el paso de los eslabones hacia la caja de cadenas.

El escobén es un conducto de sección circular o elíptica que se abre entre la cubierta y la armadura de un buque para permitir el paso de las cadenas y alojar la caña del ancla en la posición de estiba.

El estopor es un elemento de acero colocado en la cubierta entre el molinete y el escobén. Este retiene la cadena evitando que la tensión actúe directamente sobre el

molinete. Todos los estopores tienen dos partes principales: una parte fija con una ranura que permite el paso del eslabón en posición vertical y una parte móvil que trata de retener al eslabón que se encuentra en la ranura.

La caja de cadenas será el lugar del buque donde se estiban las cadenas de las anclas. Deben colocarse debajo del molinete y en las proximidades de su vertical. Las cadenas de cada ancla deben estibarse por separado, siendo necesaria la existencia de un mamparo que evite que se puedan mezclar. El fondo de la caja de cadenas debe hacerse de tal modo que permita el achique del agua y fango que se pueda ir depositando.

2.2.1. Parámetros elegidos para el sistema de fondeo

Los medios de fondeo se calculan partiendo del numeral de equipo. El numeral de equipo es un número adimensional que sirve para determinar el equipo de anclas y cadenas en función de la reglamentación de las sociedades de clasificación. El número y el tamaño de las anclas apropiadas para un buque van a estar reguladas por el reglamento de dichas sociedades. Para el caso en cuestión, se hará uso del numeral de equipo de la sociedad Bureau Veritas.

Se define como numeral de equipo al número 'N' resultante de la siguiente expresión:

$$NE = K \cdot (\text{length} \cdot \text{breath} \cdot \text{depth})^{2/3}, \quad (2.1)$$

siendo *length* la eslora del buque, *breath* la manga y *depth* el calado.

El coeficiente K podrá tener distinto valor. Para el caso de remolcadores sin restricción se toma K=1,3 y para el resto de buques se toma K=2,2.

Consultando los datos de la Tabla 2-1, se obtiene el siguiente resultado para la ecuación (2.1):

$$NE = 2,2 \cdot (176,1 \cdot 29,8 \cdot 9)^{2/3} = 3063 \quad (2.2)$$



Una vez obtenido el numeral de equipo, se obtendrán los distintos datos del sistema de fondeo consultando las tablas de la sociedad de clasificación correspondiente en función del numeral de equipo (NE) obtenido.

E.N.	Stockless bower anchors		Stud link chain cable for bower anchors			
	No. *	Mass per anchor (kg)	Total length (m)	Min. dia.		
				Mild steel Gr. 1 (mm)	Special quality Gr. 2 (mm)	Extra special quality Gr. 3 (mm)
1	2	3	4	5	6	7
2700-2870	3	8300	632.5	92	81	70
2870-3040	3	8700	632.5	95	84	73
3040-3210	3	9300	660	97	84	76
3210-3400	3	9900	660	100	87	78
3400-3600	3	10500	660	102	90	78
3600-3800	3	11100	687.5	105	92	81
3800-4000	3	11700	687.5	107	95	84
4000-4200	3	12300	687.5	111	97	87

Tabla 2-2. Tabla Numeral de Equipo

De este modo se podrá conocer el número de anclas, su peso, el diámetro del eslabón de cadena, la longitud total de cadena, la carga de rotura, la longitud del cable de remolque y el número de amarras con su longitud y carga de rotura. Consultando los valores de la Tabla 2-2 se puede obtener la masa para el anclaje, fundamental para la simulación, que es de 9300 kg. De este modo, se hará uso de un ancla comercial que se ajuste a estas características.

Cada línea horizontal de la tabla muestra el equipo de fondeo correspondiente a un buque cuyo numeral de equipo se encuentre entre los valores indicados. Una vez identificada la fila en la que se encuentra el numeral obtenido, los valores restantes de dicha fila muestran los valores del equipo de fondeo que le corresponde al buque en cuestión.

2.3. Modelo de CAD del buque

Una vez esté completado el plano de formas del buque, este puede ser empleado para generar la superficie que da forma al casco del mismo. A partir de este sistema de curvas proyectadas en distintos planos, se podrá generar la superficie del casco empleando un programa de modelado 3D. Se hará uso del software Rhinoceros.

El primer paso será importar los planos de formas y orientarlos de forma correcta en base a un punto común. Es importante que el plano transversal quede correctamente centrado respecto al plano longitudinal. De este modo, las líneas de proa y popa quedarán extendidas a un lado u otro del plano longitudinal para facilitar la obtención de la superficie. El plano base se representa en una mitad, pues este es simétrico. Este plano se importará a ambos lados del plano longitudinal para emplear como ayuda en la construcción del casco, aunque no será necesaria la utilización de sus curvas para generar la superficie. Sus curvas servirán de referencia para desplegar correctamente las curvas del plano base. En la Figura 2-3 se puede apreciar la correcta ubicación de los planos de formas en el espacio 3D:

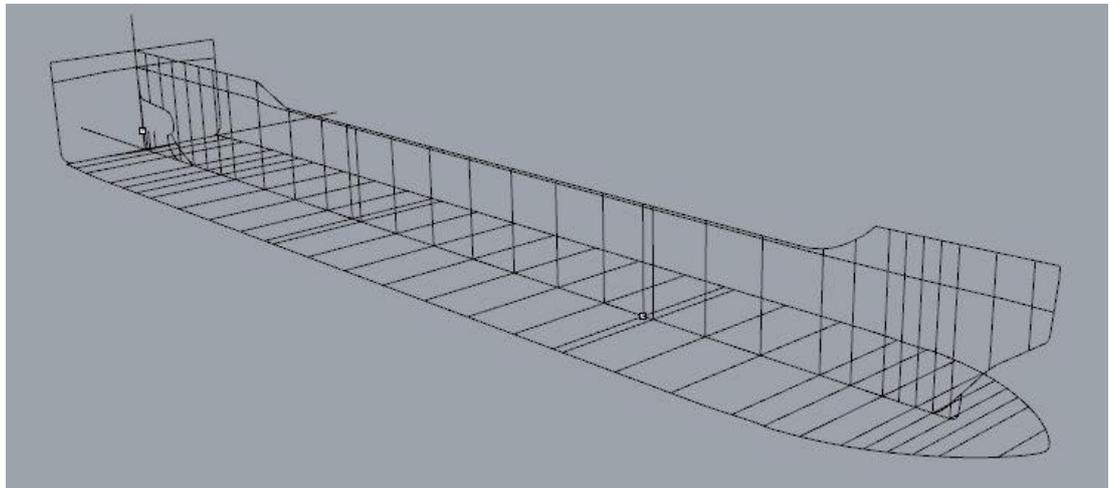


Figura 2-3. Planos de formas

Una vez se hayan definido los planos correctamente, se tendrán que trasladar las curvas de proa y de popa a su posición real respecto al plano longitudinal, pues ahora están todas proyectadas en el plano transversal. Al finalizar este proceso, las curvas de proa

quedarán a un lado del plano longitudinal y las de popa al otro lado. Se tomará un conjunto de estas curvas, las de proa o las de popa, y se trasladarán al lado opuesto para que todas las curvas se encuentren alineadas.

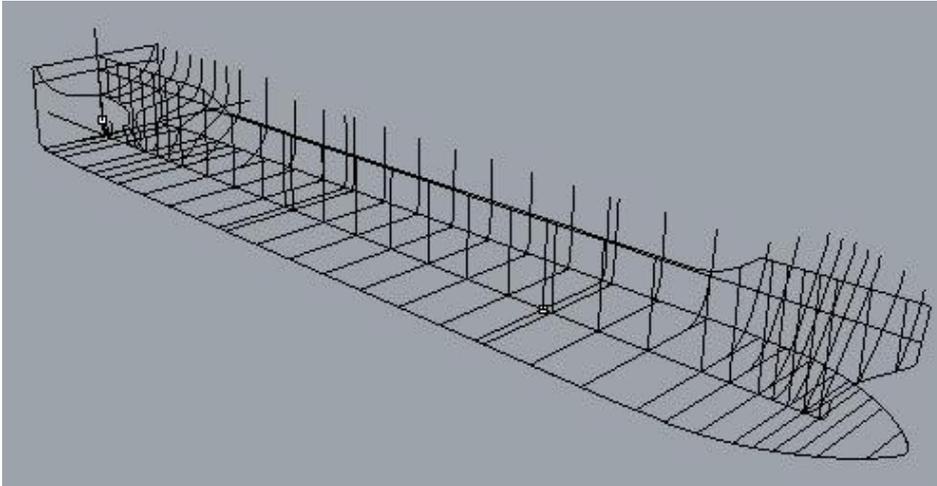


Figura 2-4. Planos de formas desplazados

Tras haber ubicado cada curva en su lugar correspondiente, se podrá comenzar a dar forma a la superficie del casco. Se seleccionarán todas las curvas y, a través del comando ‘Transición’ en las opciones de superficie, se generará la superficie resultante del casco. Una vez obtenida dicha superficie, se realizará una simetría respecto al plano longitudinal para generar la otra mitad del casco.

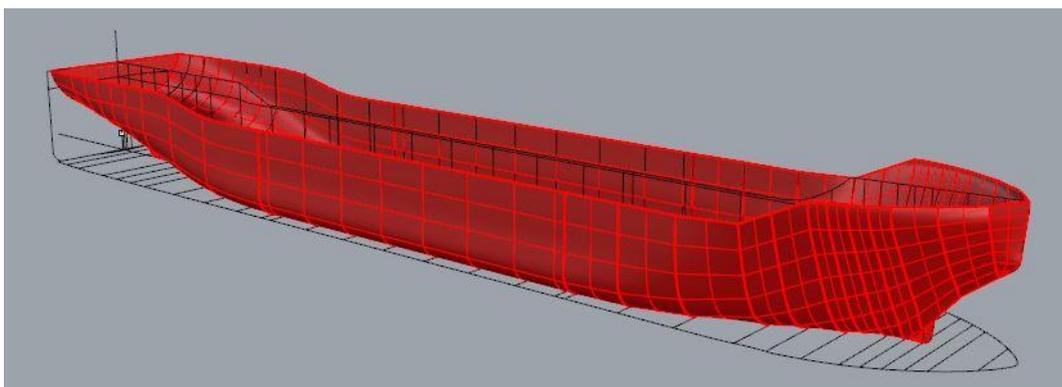


Figura 2-5. Modelado del casco

El objetivo de la simulación se centra en la operación del sistema de fondeo, siendo la proa la parte de interés del casco para este estudio. Por ello, se han creado distintas

capas que incluyen diferentes zonas del casco: la proa, la zona central y la popa. Con el fin de optimizar la simulación, únicamente se empleará la zona de proa para realizar la simulación, además de facilitar la visualización de la maniobra al focalizarla en esta zona. La superficie del casco de proa que será empleada en la simulación se puede apreciar en la Figura 2-6:

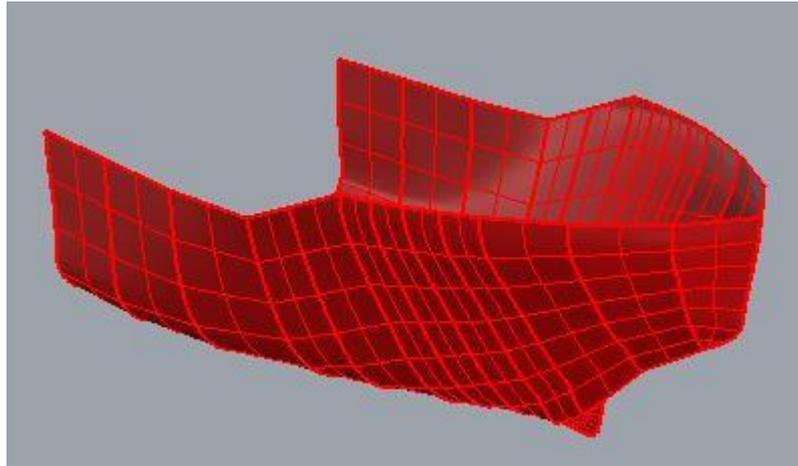


Figura 2-6. Modelado de proa

Con la superficie del casco definida, el siguiente paso será refinar la malla para obtener un diseño más limpio y, por otra parte, modelar la cubierta y el resto de elementos que intervienen en la simulación. Estos trabajos serán realizados con el software Solid Edge, que permitirá añadir estos elementos al casco creado con gran precisión y haciendo posible lograr las complicadas formas que toman algunos cuerpos.

Es necesario exportar el modelo de Rhinoceros a un formato compatible con el nuevo software a emplear. Posteriormente se importará en Solid Edge para comenzar a refinar la superficie lograda. Será necesario recalcular la malla para que ésta presente una mayor uniformidad en su conjunto. De este modo, se evitarán posibles imperfecciones en aquellas zonas en las que el casco adopta formas más estilizadas. Es de vital importancia que la superficie final tenga un diseño limpio y óptimo para garantizar una buena interacción en la simulación de los distintos elementos que componen el sistema de fondeo. La existencia de imperfecciones en los cuerpos puede alterar los contactos entre estos, creando imprecisiones en los cálculos que no son deseables.



En el diseño de la cubierta, es muy importante conocer los requerimientos a los que debe adaptarse para garantizar su correcta integración en el casco del buque. Durante la navegación, el buque está sometido a continuos movimientos ocasionados por el oleaje. Estos movimientos se deben a los seis grados de libertad, tres de traslación y tres de rotación:

- Traslaciones
 - Traslación vertical. Este movimiento se debe a la flotación del barco, pudiendo ser de ascenso o descenso.
 - Traslación lateral. Este movimiento, conocido como ronza, se debe al desplazamiento lateral del barco de una banda a otra.
 - Traslación longitudinal. Este movimiento se debe al avance o retroceso a lo largo del plano longitudinal.
- Rotaciones
 - En eje vertical. Esta rotación, conocida como virada, se debe principalmente a la acción del timón, aunque puede ser ocasionada por otros fenómenos como el viento.
 - En eje transversal. Esta rotación, conocida como cabeceo cuando desciende la proa o arfada cuando esta asciende, se debe a la rotación en el eje transversal del buque, ocasionando desplazamientos verticales en proa o en popa.
 - En eje longitudinal. Esta rotación, conocida como escorado, se debe a la rotación del casco de una banda a otra.

Durante la navegación el buque experimenta una combinación de estos movimientos, y el agua llega a alcanzar la cubierta en numerosas ocasiones, sobre todo en condiciones muy adversas. Si esta agua que se deposita en la cubierta no se desaloja, supone un riesgo muy importante, pues podría provocar el hundimiento del buque. Para facilitar la expulsión del agua que pueda alojarse en la cubierta, se dota a la misma de una curvatura que dirija el agua hacia los laterales del barco para su expulsión. Esta curvatura de la cubierta se denomina brusca y será necesario calcular su trazado en función de las medidas del buque.

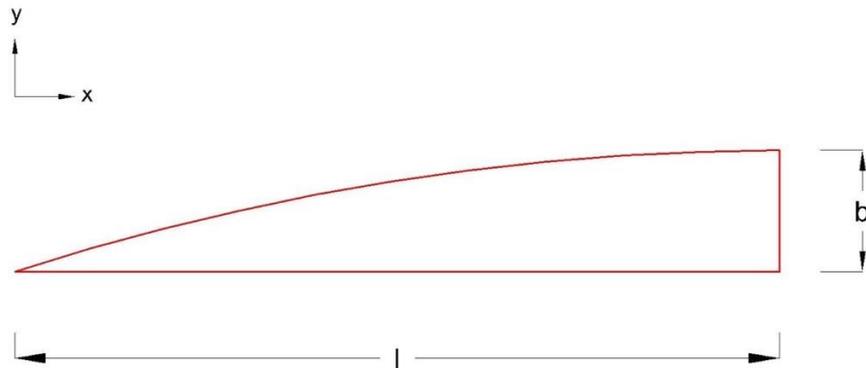


Figura 2-7. Trazado de la brisca

Como se puede apreciar en la Figura 2-7, 'b' representa la altura en el centro de la cubierta y 'l' la mitad de la manga, pues la cubierta será simétrica respecto al plano longitudinal. El valor de 'b' estará situado entre 1/48 y 1/50 de la manga máxima, en función de la altura que se pueda emplear por cuestiones de diseño; en este caso es suficiente emplear un coeficiente de 1/50. El valor de 'l' será igual a la mitad de la manga máxima. De este modo, teniendo en cuenta los datos de la Tabla 2-1, los valores que se obtienen son los siguientes:

$$b = \text{manga} \cdot \frac{1}{50} = 0,596m \quad (2.3)$$

$$l = \frac{29,8}{2} = 14,9m \quad (2.4)$$

El siguiente paso es establecer un número de divisiones para calcular la altura de la cubierta en dichas divisiones, para así generar la curva que dará forma a la superficie de la cubierta. Se toman al menos cuatro segmentos para obtener una precisión suficiente. Con este número, se crean las divisiones correspondientes en 'l' y en 'b'. Las divisiones de 'b' se trasladan a la vertical en 'O', y cada una de ellas se une con la altura máxima en '4', que representa la altura máxima de la cubierta. Cada línea generada va a determinar un punto de corte en cada división, dando la altura de la cubierta en dicho punto. Las divisiones resultantes se pueden apreciar en la Figura 2-8:

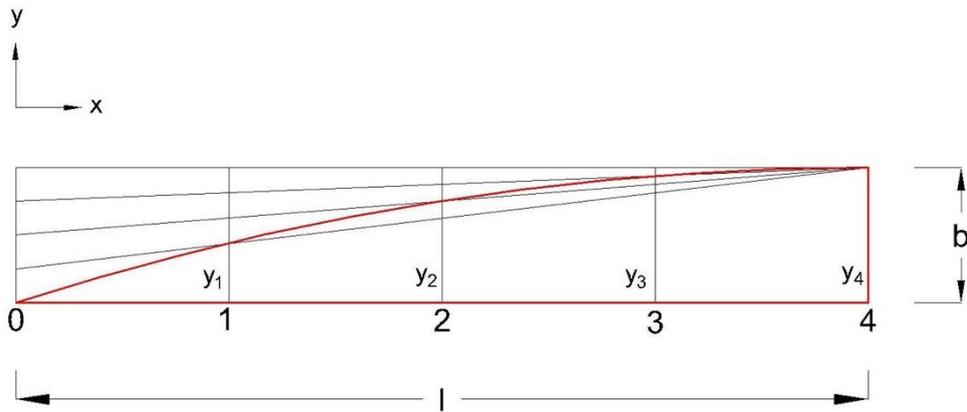


Figura 2-8. Divisiones para cálculo de brуска

Una vez conocidos estos puntos se podrá calcular su valor, que representa la altura de la cubierta en cada uno. La expresión para obtener dicha altura viene dada por:

$$y_1 = \frac{b}{l^2} \cdot x_1^2 \quad (2.5)$$

$$y_2 = \frac{b}{l^2} \cdot x_2^2 \quad (2.6)$$

$$y_3 = \frac{b}{l^2} \cdot x_3^2 \quad (2.7)$$

$$y_4 = \frac{b}{l^2} \cdot x_4^2 \quad (2.8)$$

Para cada división, la altura correspondiente es la siguiente:

$$x_1 = 3725mm \triangleright y_1 = 37,25mm \quad (2.9)$$

$$x_2 = 7450mm \triangleright y_2 = 149mm \quad (2.10)$$

$$x_3 = 11175mm \triangleright y_3 = 335,25mm \quad (2.11)$$

$$x_4 = 14900mm \triangleright y_4 = 596mm \quad (2.12)$$

Con estos datos se puede generar una curva en el software CAD para generar la superficie de la cubierta. Primero se realizará el boceto que represente la brisca con los datos calculados, para posteriormente generar la superficie a partir de dicho boceto.

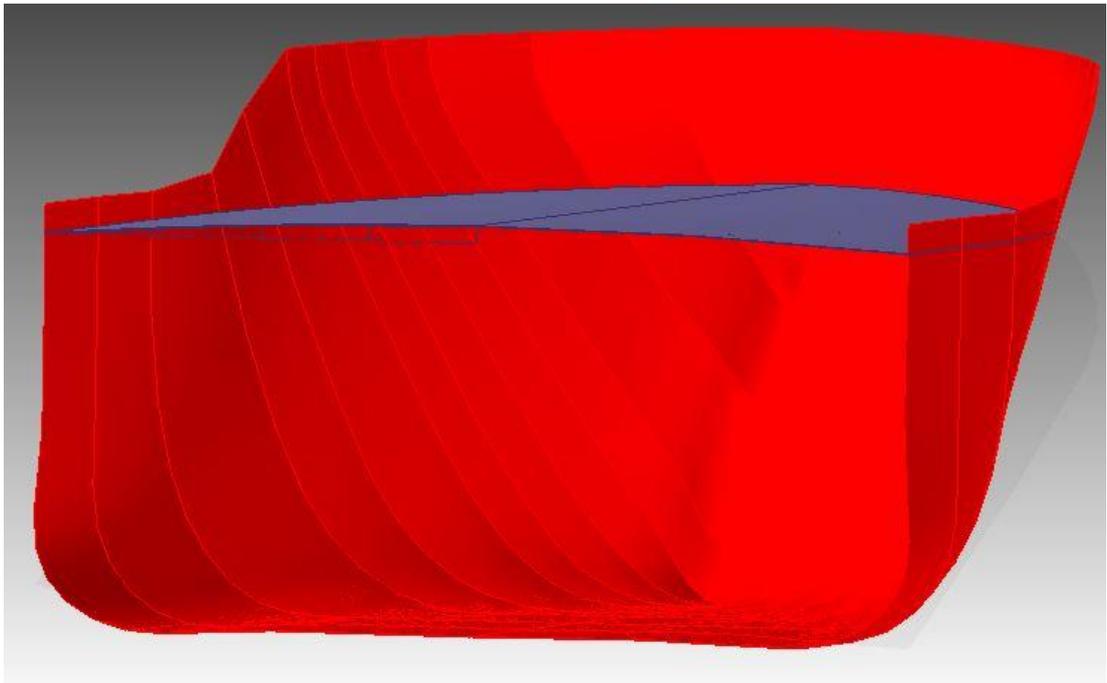


Figura 2-9. Modelado de la cubierta

El siguiente elemento a definir es el escobén. Este elemento es de vital importancia en el sistema de fondeo. Forma la conexión entre la cubierta y el casco, atravesando el mismo para que la cadena pueda descender el ancla hasta el fondo marino. El primer parámetro fundamental para su diseño es el diámetro, pues debe permitir el paso de la cadena empleada y evitar que la caña del ancla pueda quedar atrapada cuando se procede al estibado. Además, debe permitir acomodar la caña cuando el ancla está completamente estibada. También requiere especial atención la inclinación que presentará, pues es fundamental para los contactos que los bordes sean suaves para facilitar el paso de los elementos. Unas uniones entre estos elementos muy remarcadas podrían propiciar rozamientos elevados que pueden dañar seriamente los equipos del sistema de fondeo. Por último, será necesario diseñar una prolongación del escobén

que permita enfocar la cadena hacia el molinete, facilitando el traslado de la cadena a la propia caja de cadenas.



Figura 2-10. Modelado del escobén

Los modelos del grillete, la caña y las uñas del ancla han sido facilitados por Navantia, correspondiéndose a elementos de un buque real. Estos elementos cumplen con las características que se han ido definiendo anteriormente.

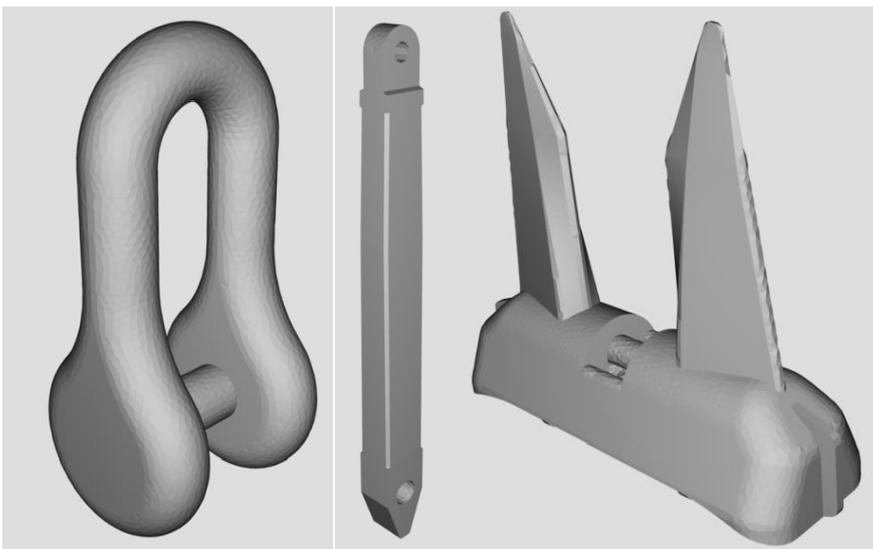


Figura 2-11. Grillete, caña y ancla



Capítulo 3

La dinámica de sistemas multicuerpo

3. La dinámica de sistemas multicuerpo

Un sistema multicuerpo o multibody system es la modelización física del conjunto de sólidos de un mecanismo y las relaciones y restricciones que existen entre ellos. A través de los sistemas multicuerpo podemos estudiar la cinemática, la dinámica inversa o la dinámica directa del mecanismo. El tipo de problema de interés para este proyecto es el de dinámica directa, que permite conocer la posición, velocidad y aceleración del sistema conocidas las fuerzas que actúan sobre los sólidos del mismo.

El primer paso es la modelización del sistema multicuerpo. Para la aplicación de la modelización multicuerpo es precisa la parametrización de las posiciones de los sólidos mediante unas coordenadas apropiadas y la definición de las ecuaciones de restricción que ligan estas coordenadas.

El siguiente paso es la resolución de la cinemática del sistema en la posición inicial, obteniendo unas posiciones y velocidades iniciales que cumplan las ecuaciones de restricción. A continuación se lleva a cabo un tercer paso es opcional: el planteamiento de las ecuaciones de la estática del sistema y la resolución de la posición de equilibrio inicial del mismo. Finalmente, el último paso es el planteamiento y resolución de las ecuaciones del movimiento o ecuaciones dinámicas del sistema en cada paso de tiempo. Las entradas al problema dinámico son las fuerzas actuantes sobre el sistema y dichas fuerzas son tremendamente complejas de obtener, resultado de la evaluación de complejos modelos de fuerzas, siendo su obtención un formidable problema en sí mismo.

Es fundamental conocer la disciplina de dinámica de sistemas multicuerpo para comprender la base de cálculo del software SIMULANCLA. A partir de la solución multicuerpo, será posible la obtención de todos aquellos resultados que nos permitan analizar la dinámica de la maniobra de fondeo.



3.1. Modelización en coordenadas mixtas

Las coordenadas son variables que definen completamente la posición de un mecanismo. Generalmente se trata de puntos, vectores, ángulos y distancias.

Existen diferentes tipos de definición mediante coordenadas, y cada una de ellas va a dar lugar a distintos planteamientos del problema. En nuestro caso, se elegirá un sistema mixto de coordenadas, esto es, elegiremos simultáneamente dos tipos de definición para optimizar la solución del problema y aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, minimizando así la posibilidad de que aparezcan problemas.

Estos dos tipos de coordenadas serán las naturales y las relativas. Las primeras se emplearán para modelizar sólidos, y las segundas para actuadores (motores), definición de posiciones grados de libertad e introducción de ciertos tipos de fuerzas.

3.1.1. Las coordenadas naturales

Las coordenadas naturales son básicamente las coordenadas cartesianas de puntos y vectores unitarios unidos a los sólidos del mecanismo. Esas coordenadas sitúan cada sólido del mecanismo. Para cada sólido 3D se definen un mínimo de 12 coordenadas en total, así pues, dado que el número de grados de libertad de un sólido libre es 6, estas coordenadas son dependientes por propia definición.

Aportan la ventaja de una definición sencilla y sistemática, con ecuaciones de restricción igualmente simples, ya que son lineales o cuadráticas, pero tienen el inconveniente de que, para obtener una modelización correcta, precisan de cierta experiencia.

3.1.2. Las coordenadas relativas

Las coordenadas relativas se diferencian de las naturales en que, en lugar de referir los sólidos a un origen común a todos, se refieren cada uno de ellos a su antecesor en la cadena cinemática.

Cuando se modelizan sistemas de cadena abierta exclusivamente en coordenadas relativas, se obtiene una cinemática sin restricciones ya que el número de coordenadas relativas necesarias es igual al número de grados de libertad del sistema.

Cuando se modelizan sistemas de cadena cerrada exclusivamente con coordenadas relativas, éstas son redundantes, pero se obtiene un reducido número de ecuaciones de restricción; las necesarias para imponer las condiciones de cierre de lazo.

Cuando se emplean las coordenadas relativas conjuntamente con otros sistemas de coordenadas, éstas son especialmente apropiadas para la definición de grados de libertad, actuadores o fuerzas asociadas a pares cinemáticos. El primer inconveniente de estas coordenadas es la necesidad de situar todos los elementos anteriores de la cadena para poder conocer la posición de un sólido, por las razones anteriormente descritas.

El segundo inconveniente, es que las ecuaciones contienen términos trigonométricos bastante complejos, lo cual aumenta considerablemente el coste computacional de la resolución del problema.

3.1.3. Las coordenadas mixtas

Las coordenadas mixtas serán las empleadas en este proyecto. Utilizar dos sistemas de coordenadas diferentes nos permite aprovechar las ventajas de ambos. Por un lado, contaremos con la sencillez de las coordenadas naturales para la definición de las posiciones de los sólidos de forma independiente al resto de sólidos de la cadena cinemática, y por otro, tendremos una facilidad de definición para los grados de libertad, actuadores y fuerzas gracias a las coordenadas relativas.

Tendremos que trabajar, entonces, con los puntos y vectores de las coordenadas naturales y con los ángulos y distancias de las coordenadas relativas.



3.2. El problema cinemático: problema de posición y velocidad inicial

El problema cinemático consiste en la determinación de los posibles movimientos de un mecanismo concreto, independientemente de las fuerzas actuantes sobre él. Su resolución nos permite conocer la posición y velocidad iniciales del mecanismo, en función de las posiciones y velocidades de cada uno de los distintos grados de libertad.

3.2.1. El problema de posición inicial

Antes de simular los movimientos posibles del mecanismo debemos conocer una posición que satisfaga todas las restricciones impuestas al mismo. Así, solucionaremos este problema de posición inicial para evitar arrancar la simulación desde una posición que no cumpla las ecuaciones de restricción.

Sea un sistema multicuerpo, cuya posición se define mediante el siguiente vector de coordenadas generalizadas:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_m, z_1, z_2, \dots, z_n] \quad (3.1)$$

Donde:

q_i : coordenadas dependientes

z_i : coordenadas independientes (variables que definen los GDL)

Las coordenadas dependientes están relacionadas por un vector de m restricciones $\Phi(\mathbf{q})$ que consiste en una serie de ecuaciones no lineales. Este vector será desarrollado en serie de Taylor entorno a la posición inicial. Una vez desechados los términos de orden superior a uno, tenemos:

$$\Phi(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

$$\Phi(\mathbf{q}) = \Phi(\mathbf{q}_0) + \Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}_0)(\mathbf{q} - \mathbf{q}_0) = \mathbf{0} \quad (3.3)$$

Para resolver esta última ecuación aplicaremos el método iterativo de Newton-Raphson:

$$\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{q}_i)(\mathbf{q}_{i+1} - \mathbf{q}_i) = -\Phi(\mathbf{q}_i) \quad (3.4)$$

$\Phi_{\mathbf{q}}$ es la matriz jacobiana de las ecuaciones de restricción respecto a las coordenadas generalizadas. Nótese que los valores de \mathbf{q} z_1, z_2, z_n correspondientes a los GDL son conocidos de antemano $z_j^{i+1} - z_j^i = 0$, por tanto, las columnas correspondientes de la matriz Jacobiana siempre van a ser multiplicadas por elementos nulos y no se calculan. Para arrancar las iteraciones del método de Newton-Raphson, se parte de un \mathbf{q}_0 estimado.

Como criterio de convergencia se elige la norma-2 del vector de restricciones. Cuando en la iteración i ésima sea menor que una cierta tolerancia e_{max} se considera suficientemente aproximado el resultado.

$$e_i = \|\Phi(\mathbf{q}_i)\| = \left(\sum_{j=1}^m \Phi_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \Bigg|_i \quad (3.5)$$

3.2.2. El problema de velocidad inicial

Lo que se pretende conseguir mediante la resolución de este problema son las velocidades de las coordenadas generalizadas para el instante inicial, que son las derivadas temporales primeras de dichas coordenadas. Derivando la ecuación (3.2) con respecto al tiempo:

$$\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \Phi_t = 0 \quad (3.6)$$

$$\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = -\Phi_t \quad (3.7)$$

Del problema de posición inicial ya tenemos el jacobiano y las velocidades de los grados de libertad son conocidas de antemano, así que podemos resolver directamente la ecuación (3.6) para conocer las velocidades.



Este problema es lineal, por lo que no precisamos de un método iterativo.

3.3. El problema dinámico: ecuaciones de la dinámica

3.3.1. Introducción a la resolución de problemas dinámicos

Los dos conjuntos de ecuaciones más populares que nos permiten resolver el problema dinámico son las ecuaciones de Lagrange y las de Newton – Euler. Mientras que en estas últimas el número de ecuaciones es seis veces el número de sólidos, en las ecuaciones de Lagrange este número es proporcional al número de coordenadas generalizadas y generalmente muy inferior, por lo que se utilizarán éstas.

Utilizando las coordenadas mixtas explicadas en el apartado 3.1.3 las ecuaciones de Lagrange son:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (3.8)$$

$\Phi_{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\lambda}$ representa los esfuerzos requeridos para mantener las m restricciones entre las distintas variables dependientes y T es la energía cinética (función de la masa y la velocidad). Con las coordenadas elegidas se puede escribir de la forma siguiente:

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ecuación (3.9) en la ecuación (3.8) se obtiene:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (3.10)$$

Donde:

\mathbf{M} : matriz de masas

\mathbf{q} : vector de variables del problema

$\Phi_{\mathbf{q}}$: matriz jacobiana del vector de restricciones

λ : vector de multiplicadores de Lagrange

Q : vector de fuerzas generalizadas

El sistema (3.10) consiste en n ecuaciones, siendo n la cantidad de variables, sin embargo, existen m multiplicadores de Lagrange, tantos como ecuaciones de restricción. Por ello debemos añadir m ecuaciones de restricción. Como resultado, obtenemos un sistema compuesto por ecuaciones diferenciales y algebraicas o sistema DAE (Differential - Algebraic Equations)

$$\begin{array}{l} a) \\ b) \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \lambda = \mathbf{Q} \\ \Phi = \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Para resolver este sistema necesitaremos una formulación capaz de trabajar con él. Ya que la mayoría de los integradores están diseñados para sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias u ODE, así que previamente hemos de transformar el sistema DAE en un sistema ODE (Ordinary Differential Equations) o en un sistema que sea asimilable a un ODE.

El sistema utilizado será una formulación de Lagrange aumentado para resolver el problema dinámico en tiempo real durante la simulación. Este sistema exige partir de un campo de aceleraciones inicial para arrancar la integración numérica. Dicho campo de aceleraciones se calculará con la formulación de los penalizadores (Bayo, García de Jalón & J. & Serna 1988).

3.3.2. El primer problema dinámico: el problema de aceleración inicial

Este problema consiste en resolver el sistema (3.11) relacionando las variables del modelo con los multiplicadores de Lagrange. Así puede prescindirse de las ecuaciones (3.11) b) para obtener un sistema reducido con m ecuaciones menos en el que los multiplicadores de Lagrange no son incógnitas.

Los multiplicadores están relacionados con las fuerzas que actúan en el mecanismo para que las ecuaciones de restricción que ligan las variables se cumplan en todo instante. El método de los penalizadores (Bayo, García de Jalón & J. & Serna 1988)



impone que los multiplicadores sean proporcionales al incumplimiento de las restricciones y sus derivadas.

Se sustituyen las restricciones por sistemas muelle-amortiguador con amortiguamiento crítico, obteniendo la siguiente expresión para λ^* :

$$\lambda = \alpha (\ddot{\Phi} + 2\xi\omega\dot{\Phi} + \omega^2\Phi) \quad (3.12)$$

Donde:

α : matriz de penalizadores, es decir la rigidez de los muelles correspondientes a cada restricción. Usualmente toma valores entre 10^6 y 10^{11} .

ξ : amortiguamiento relativo. Se le suele dar el valor $\xi=1$ (amortiguamiento crítico)

ω : frecuencia natural del sistema. Se le suele dar el valor $\omega= 10$.

Sustituyendo la ecuación (3.12) en la ecuación (3.10) se obtiene:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha (\ddot{\Phi} + 2\xi\omega\dot{\Phi} + \omega^2\Phi) = \mathbf{Q} \quad (3.13)$$

El vector de segundas derivadas de las restricciones $\ddot{\Phi}$ lo calculamos derivando dos veces el vector de restricciones con respecto al tiempo:

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{q}} d\mathbf{q} + \frac{\partial\Phi}{\partial t} dt \right)}{dt} = \Phi_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} + \Phi_t \quad (3.14)$$

Donde Φ_t es el vector de derivadas parciales temporales de las restricciones.

Derivando una vez más en (3.14) se obtiene:

$$\ddot{\Phi} = \Phi_{\mathbf{q}}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\Phi}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} + \dot{\Phi}_t \quad (3.15)$$

Sustituyendo (3.15), en (3.13) y reagrupando términos se obtiene (3.16), las ecuaciones dinámicas del método de los penalizadores. Las incógnitas de este sistema son únicamente las aceleraciones $\ddot{\mathbf{q}}$.

$$(\mathbf{M} + \Phi_q^T \alpha \Phi_q) \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q} - \Phi_q^T \alpha (\dot{\Phi}_q \dot{\mathbf{q}} + \dot{\Phi}_t + 2\xi \omega \dot{\Phi} + \omega^2 \Phi) \quad (3.16)$$

3.3.3. El problema dinámico en tiempo real: formulación ALI3-P

Lo explicado anteriormente nos servirá para calcular el valor de los multiplicadores de Lagrange con suficiente precisión como para arrancar la formulación de Lagrange aumentado en index-3 con proyecciones ortogonales o ALI3-P (Index 3 Augmented Lagrange with Projections), que serán el conjunto de ecuaciones empleadas para resolver la dinámica en cada instante de tiempo.

La formulación ALI3-P es tremendamente compleja y una descripción pormenorizada se sale del ámbito de este proyecto. La descripción completa de la última versión de la formulación se puede consultar en (Dopico et al. 2014), aunque la descripción dada aquí corresponde a una versión previa de la formulación publicada en (Cuadrado et al. 2000).

La expresión de la formulación ALI3-P es:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T \alpha \Phi + \Phi_q^T \lambda^* = \mathbf{Q} \quad (3.17)$$

Siendo:

- M**: matriz de masas
- q**: vector de variables del problema
- Φ_q**: matriz jacobiana del vector de restricciones
- λ***: vector de multiplicadores de Lagrange
- Q**: vector de fuerzas generalizadas

Los multiplicadores de Lagrange son obtenidos por un proceso iterativo

$$\lambda_{i+1}^* = \lambda_i^* + \alpha \Phi_{i+1}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3.18)$$



λ_0^* se inicializa con valor nulo en la primera iteración $t=0$. En los siguientes pasos de tiempo $t=n\Delta t$, el valor de λ_0^* será el valor de λ_{n-1}^* . Cuando el proceso converja se obtendrán los valores exactos de λ_n^* .

El integrador empleado es la regla trapezoidal implícita de paso simple. Las ecuaciones en velocidades y aceleraciones son las siguientes:

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{2}{\Delta t} \mathbf{q}_{n+1} + \hat{\mathbf{q}}_n \quad \text{con} \quad \hat{\mathbf{q}}_n = -\left(\frac{2}{\Delta t} \mathbf{q}_n + \dot{\mathbf{q}}_n \right) \quad (3.19)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{q}_{n+1} + \hat{\mathbf{q}}_n \quad \text{con} \quad \hat{\mathbf{q}}_n = -\left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{q}_n + \frac{4}{\Delta t} \dot{\mathbf{q}}_n + \ddot{\mathbf{q}}_n \right) \quad (3.20)$$

Podemos comprobar que en esta última ecuación aparece el término $\ddot{\mathbf{q}}_n$ perteneciente al paso de tiempo anterior. Esto justifica el cálculo del campo de aceleraciones inicial mediante el método de los penalizadores. En los siguientes pasos de tiempo $t=(n+1)\Delta t$ se tomará el vector de aceleraciones correspondiente al estado $t=ndt$.

Introduciendo las ecuaciones (3.19) y (3.20) en la ecuación (3.17) se obtiene el sistema:

$$\mathbf{M} \left(\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{q}_{n+1} + \hat{\mathbf{q}}_n \right) + \Phi_{q_{n+1}}^T (\alpha \Phi_{n+1} + \lambda_{n+1}) - \mathbf{Q}_{n+1} = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M} \mathbf{q}_{n+1} + \mathbf{M} \hat{\mathbf{q}}_n + \Phi_{q_{n+1}}^T (\alpha \Phi_{n+1} + \lambda_{n+1}) - \mathbf{Q}_{n+1} = 0 \quad (3.22)$$

Escalando por $\frac{4}{\Delta t^2}$ se obtiene:

$$\mathbf{M} \mathbf{q}_{n+1} + \frac{\Delta t^2}{4} \left(\mathbf{M} \hat{\mathbf{q}}_n + \Phi_{q_{n+1}}^T \alpha \Phi_{n+1} + \Phi_{q_{n+1}}^T \lambda_{n+1} - \mathbf{Q}_{n+1} \right) = 0 \quad (3.23)$$

Para resolver el sistema no lineal (3.21) se usa el método iterativo de Newton-Raphson.

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right]_i \Delta \mathbf{q}_i = -[\mathbf{f}(\mathbf{q})]_i \quad (3.24)$$

Siendo:

$$[\mathbf{f}(\mathbf{q})] = \frac{\Delta t^2}{4} (\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T \alpha \Phi + \Phi_q^T \lambda^* - \mathbf{Q}) \quad (3.25)$$

La matriz tangente exacta es complicada de obtener, por tanto, se utiliza la matriz tangente aproximada siguiente:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \right] \approx \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\Phi_q^T \alpha \Phi_q + \mathbf{K}) \quad (3.26)$$

Donde:

$$\mathbf{K} = -\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{q}} : \text{matriz de rigidez.}$$

$$\mathbf{C} = -\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} : \text{matriz de amortiguamiento.}$$

Este proceso conduce a una serie de posiciones \mathbf{q}_{n+1} que satisfacen las ecuaciones del movimiento (3.21) y las ecuaciones de restricción. Sin embargo, es posible que no se cumpla $\dot{\Phi} = 0$ y $\ddot{\Phi} = 0$, por lo que para solventar este problema se emplearán las proyecciones ortogonales en velocidades y aceleraciones.

Si $\dot{\mathbf{q}}^*$ y $\ddot{\mathbf{q}}^*$ son las velocidades obtenidas después de la convergencia del método de Newton-Raphson, las velocidades y aceleraciones depuradas se calculan según las siguientes expresiones:

$$\left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\Phi_q^T \alpha \Phi_q + \mathbf{K}) \right] \dot{\mathbf{q}} = \left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{K} \right] \dot{\mathbf{q}}^* - \frac{\Delta t^2}{4} \Phi_q^T \alpha \Phi_t \quad (3.27)$$



$$\begin{aligned} & \left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\mathbf{\Phi}_q^T \boldsymbol{\alpha} \mathbf{\Phi}_q + \mathbf{K}) \right] \ddot{\mathbf{q}} = \\ & = \left[\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\Delta t^2}{4} (\mathbf{K}) \right] \ddot{\mathbf{q}}^* - \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{\Phi}_q^T \boldsymbol{\alpha} (\dot{\mathbf{\Phi}}_q \dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{\Phi}}_t) \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.4. Modelización elegida para el sistema de fondeo

Para modelizar cualquier sólido necesitamos cuatro entidades (12 coordenadas generalizadas), ya sean puntos o vectores, definiendo siempre al menos un punto y al menos un vector. Esto nos permitirá representar el sólido en cuestión en un espacio tridimensional y orientarlo, ya que construiremos, para cada sólido, un sistema de referencia formado por un punto y tres vectores linealmente independientes.

Se puede demostrar que, definiendo los sólidos de esta manera, la matriz de masas y el vector de fuerzas generalizadas gravitatorias son constantes y no aparecerán en ellos términos de fuerzas de inercia dependientes de la velocidad o fuerzas dependientes de la velocidad respectivamente. Esto nos permite calcularla solamente en el instante inicial y prescindir de un cálculo continuo.

El software SIMULANCLA emplea la biblioteca de sistemas multicuerpo MBSLIM (Multibody Systems en Laboratorio de Ingeniería Mecánica) para llevar a cabo la tarea de modelización del sistema de fondeo, planteamiento y resolución de las ecuaciones del movimiento.

Simulancla emplea las siguientes restricciones entre las coordenadas naturales para definir un sólido rígido:

1. Distancia: para puntos se impone que la distancia entre dos puntos sea constante. En el caso de vectores, la norma del vector ha de ser la unidad. Es una sola ecuación.

$$(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^T (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - l_{ij}^2 = 0 \quad (3.29)$$

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i - 1 = 0 \quad (3.30)$$

2. Producto escalar constante: el ángulo entre dos vectores se mantendrá constante. Si el sólido se define con más de un punto se tomarán como vectores los que unen esos puntos. Es una sola ecuación.

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_j - k_k = 0 \quad (3.31)$$

$$(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^T \mathbf{v}_k - k_l = 0 \quad (3.32)$$

$$(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^T (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - k_m = 0 \quad (3.33)$$

3. Combinación lineal: los elementos de modelización del sólido forman un subespacio. Los puntos y vectores definidos a mayores para facilitar la definición del modelo pertenecerán a ese subespacio (serán linealmente dependientes) y además su posición en coordenadas locales permanecerá constante el tiempo, es decir los valores de los parámetros de combinación lineal serán constantes.

Con esta restricción ocurre lo mismo que con la de producto escalar, si se modeliza con más de un punto se tomará como vector el que los une.

Se trata de una ecuación vectorial lo que equivale a tres ecuaciones.

$$\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j - \alpha_{k1} \cdot \mathbf{v}_l - \alpha_{k2} \cdot \mathbf{v}_m - \alpha_{k3} \cdot \mathbf{v}_n = 0 \quad (3.34)$$

$$\mathbf{v}_i - \alpha_{k1} \cdot \mathbf{v}_l - \alpha_{k2} \cdot \mathbf{v}_m - \alpha_{k3} \cdot \mathbf{v}_n = 0 \quad (3.35)$$

Donde \mathbf{p}_i y \mathbf{v}_i son el punto o vector extra que no pertenece a la definición del sólido.

Estas restricciones son incluidas automáticamente cuando se modeliza un sólido en MBSLIM. Ahora resta añadir las restricciones externas dependientes del mecanismo.

Para definir los GDL utilizaremos coordenadas relativas, creando así las variables adicionales que nos permitirán el guiado.

3.4.1. Definición del buque

El suelo se define con el punto p_1 y los vectores v_1 , v_2 y v_3 . Esto forma un sistema de coordenadas fijo al suelo del muelle, así que no es necesario incluir estas entidades en el vector de variables, pero sí precisaremos de ellas para la modelización gráfica.

3.4.2. Definición de sólidos del sistema de fondeo

Eslabones de la cadena.

Se describirán a continuación las variables y restricciones para dos eslabones consecutivos de la cadena.

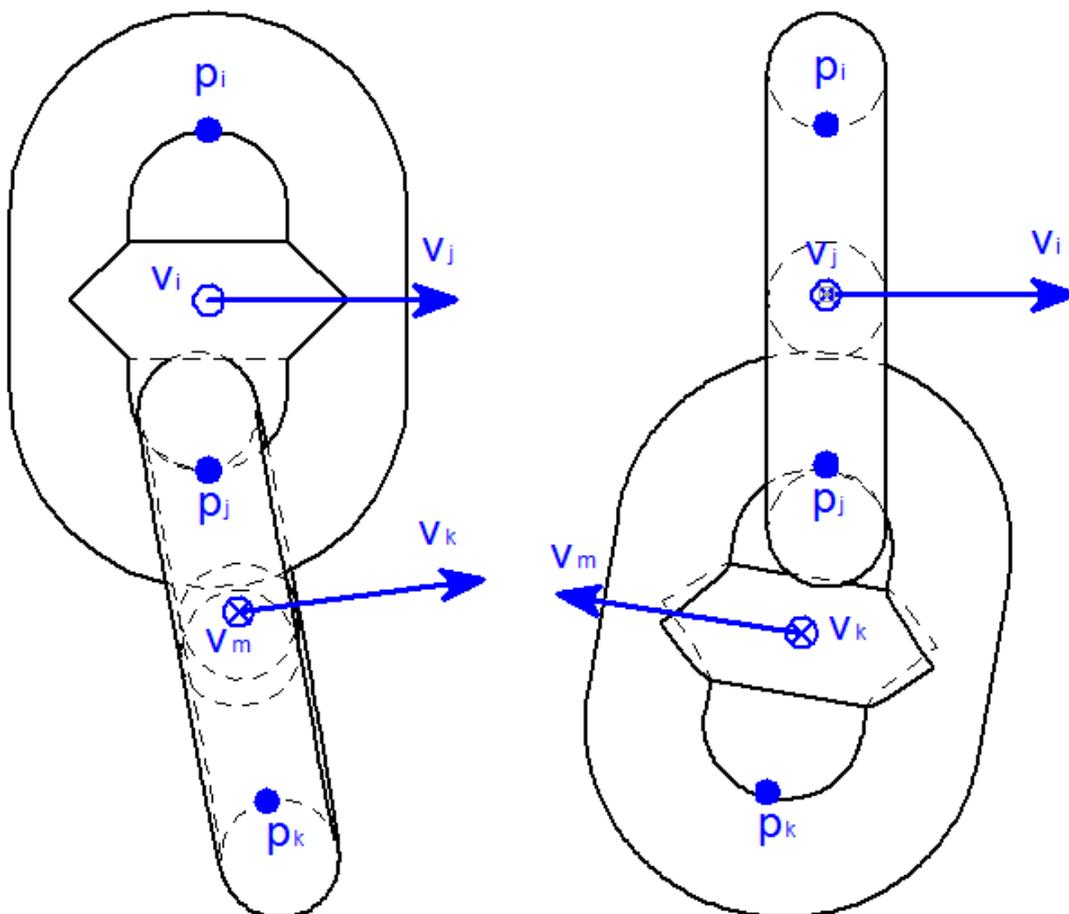


Figura 3-1. Restricciones para los eslabones



Variables de los elementos:

- Puntos: $\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_k$
- Vectores: $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k, \mathbf{v}_m$.

Elementos modelización:

Dos puntos y dos vectores por sólido. Hay un punto compartido entre eslabón y eslabón.

Restricciones adicionales:

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_k = 0$$

$$\mathbf{v}_j^T \mathbf{v}_m = 0$$

Número de grados de libertad:

El número de grados de libertad entre sólidos, teniendo en cuenta las restricciones automáticas y adicionales es de 2 entre eslabones de la cadena.

Grillete y caña

Se describirán a continuación las variables y restricciones para el grillete y la caña.

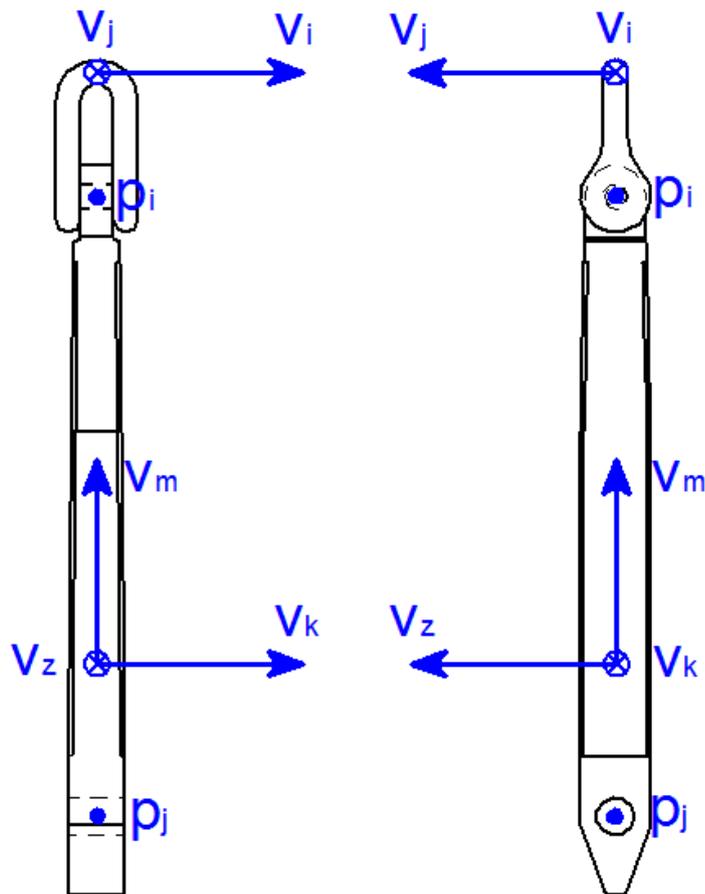


Figura 3-2. Restricciones para el grillete y la caña

Variables elemento:

- Puntos: p_i , p_j
- Vectores: v_i , v_j , v_k , v_m , v_z

Elementos modelización:

Un punto y dos vectores para el grillete y dos puntos y tres vectores para la caña.

Restricciones:

No son necesarias restricciones adicionales a las impuestas por la MBSLIM debido a que se comparte un punto y el vector del eje.

Número de grados de libertad:

Realizando el cómputo de las variables y restricciones impuestas, sale un grado de libertad entre el grillete y la caña.

Caña y ancla

Se describirán a continuación las variables y restricciones para la caña y el ancla.

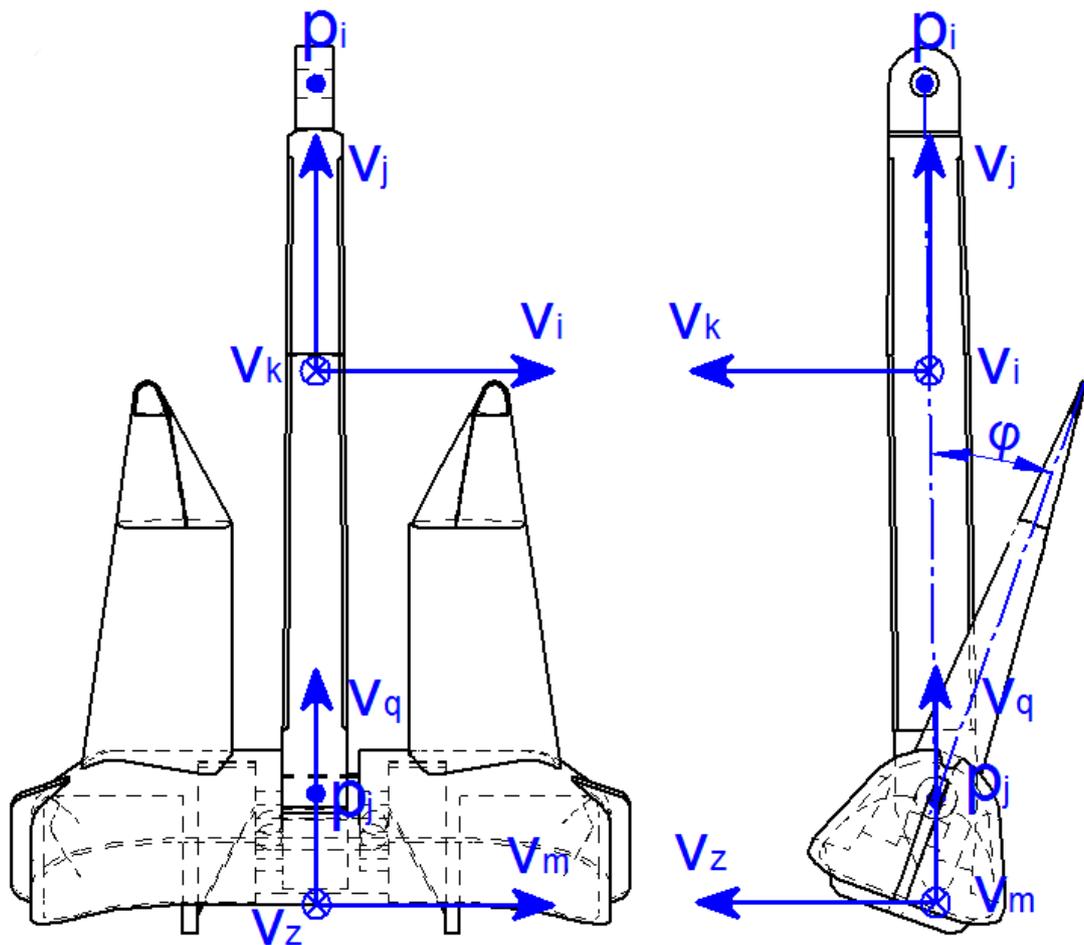


Figura 3-3. Restricciones para la caña y las uñas del ancla

Variables elemento:

- Puntos: p_i , p_j
- Vectores: v_i , v_j , v_k , v_m , v_q , v_z
- Ángulo φ



Elementos modelización:

Dos puntos y tres vectores para la caña y un punto y tres vectores para las uñas del ancla.

Restricciones:

No son necesarias restricciones adicionales a las impuestas por la MBSLIM debido a que se comparte un punto y el vector del eje.

Número de grados de libertad:

Realizando el cómputo de las variables y restricciones impuestas, sale un grado de libertad entre la caña y las uñas del ancla.

3.4.3. Grados de libertad

Haremos en primer lugar un balance de ecuaciones/variables para poder apreciar con mayor claridad los GDL.

Sólido	Grados de libertad relativos
Eslabón 1	3
...	...
Eslabón "i"	2
Caña	1
Ancla	1

Tabla 3-1 Balance de grados de libertad.

3.4.4. El vector de variables

Ahora que conocemos las variables y restricciones que van a condicionar la simulación, podemos crear un vector, llamado vector de variables, que recogerá todas las variables que se introdujeron mediante la modelización de cada sólido más las variables correspondientes a la carga, más las que definen cada uno de los grados de libertad. Este vector \mathbf{q} variará en cada paso integrable del tiempo, recogiendo el valor de cada variable. Tendrá la siguiente forma:

$$\mathbf{q} = \left[\mathbf{p}_{i \text{ con } i=2,3,\dots,20}, \mathbf{v}_{i \text{ con } i=4,5,\dots,16}, \varphi_{i \text{ con } i=1,2,\dots,5}, s_1, s_2, s_3 \right] \quad (3.36)$$

3.4.5. Fuerzas

Fuerzas normales de contacto

El modelo de fuerzas de contacto normales empleado en este trabajo, es el modelo desarrollado por Flores en el 2011 en (Flores et al. 2011). El modelo es muy similar al modelo de Hunt-Crossley, desarrollado originalmente en (Hunt & Crossley 1975). La expresión de la fuerza normal del modelo de Flores es la siguiente:

$$\mathbf{F}_n = k_n \delta^n \left(1 + \frac{8(1-\epsilon)}{5\epsilon} \frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}_0} \right) \mathbf{n} \quad (3.37)$$

donde k_n es la rigidez equivalente del contacto y depende de la forma y el material de los sólidos que colisionan, n es el exponente de Hertz, $\delta = R_{sph} - |\mathbf{p}_{center} - \mathbf{p}_{contact}|$ es la indentación, $\dot{\delta}$ es su derivada temporal, $\dot{\delta}_0$ es la velocidad normal relativa entre los sólidos en colisión cuando el contacto es detectado, ϵ es el coeficiente de restitución y \mathbf{n} es la dirección de la fuerza de contacto normal.

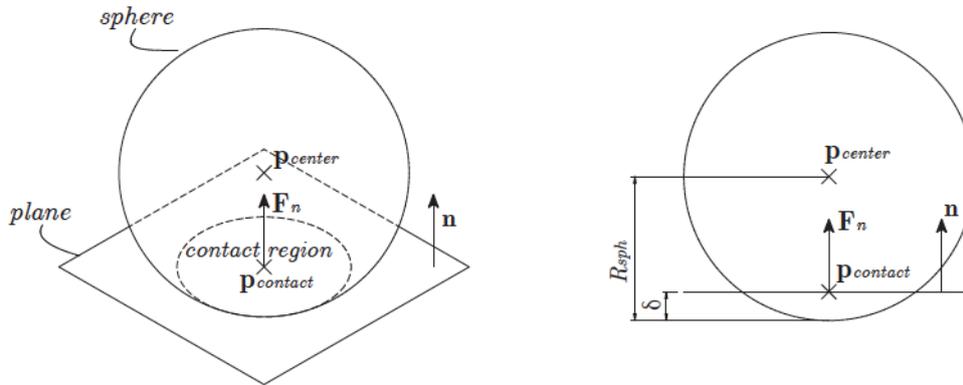


Figura 3-4. Contacto normal

El valor de k_n se puede calcular para dos sólidos en contacto con geometrías de esfera y plano respectivamente en los que la expresión para la rigidez puede ser expresada por

$$k_n = \frac{4}{3(\sigma_{sph} + \sigma_{pln})} \sqrt{R_{sph}} \quad (3.38)$$

siendo R_{sph} el radio de la esfera en contacto con el plano y los parámetros de sus respectivos materiales σ_{sph} y σ_{pln} vienen dados por

$$\sigma_{sph} = \frac{1 - \nu_{sph}^2}{E_{sph}}; \quad \sigma_{pln} = \frac{1 - \nu_{pln}^2}{E_{pln}} \quad (3.39)$$

donde ν y E son el cociente de Poisson y el módulo de Young o módulo elástico para cada uno de los dos materiales.

Fuerzas de rozamiento de contacto

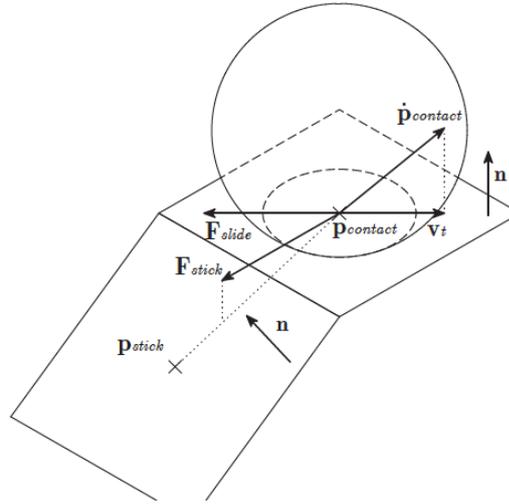


Figura 3-5. Contacto tangencial

El modelo de fuerzas de contacto tangenciales, o fuerzas de fricción, fue desarrollado en detalle en (Dopico et al. 2011) y está basado en la ley de Coulomb del rozamiento seco incluyendo *sticktion* (adhesión) y un término de disipación viscosa. La forma general de la fuerza es la siguiente,

$$\mathbf{F}_t = \kappa \mathbf{F}_{stick} + (1 - \kappa) \mathbf{F}_{slide} - \mu_{visc} \mathbf{v}_t \quad (3.40)$$

En la expresión previa, los primeros dos términos constituyen el rozamiento seco, mientras que el tercer término representa el rozamiento viscoso. Para tener una transición suave entre *sticking* (adhesión) y *slipping* (deslizamiento), la fuerza de fricción se divide en dos componentes acopladas mediante una función suave, siguiendo las ideas propuestas en (Gonthier et al. 2004). El subíndice “t” indica aquí “tangencial”.

En la ecuación (3.40), μ_{visc} es el coeficiente de rozamiento viscoso, \mathbf{F}_{stick} y \mathbf{F}_{slide} son las componentes de *sticktion* o adhesión y *slipping* o deslizamiento, es una función suave de la velocidad tangencial en el punto de contacto, \mathbf{v}_t que está definida en



función del punto central de la región de contacto, $\mathbf{p}_{contact}$ y el vector normal al contacto, \mathbf{n} , como sigue:

$$\mathbf{v}_t = \dot{\mathbf{p}}_{contact} - \left(\mathbf{n}^T \dot{\mathbf{p}}_{contact} \right) \mathbf{n} \quad (3.41)$$

La citada función, tiene que cumplir las siguientes condiciones,

$$\kappa = \begin{cases} 0; & |\mathbf{v}_t| \gg v_{stick} \\ 1; & |\mathbf{v}_t| = 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

donde v_{stick} es un parámetro del modelo que tiene en cuenta la velocidad de transición entre adhesión y deslizamiento. Una buena elección para esta función de transición fue proporcionada por (Gonthier et al. 2004) y tiene la siguiente expresión:

$$\kappa = e^{-\left(\mathbf{v}_t^T \mathbf{v}_t\right) / v_{stick}^2} \quad (3.43)$$

La ecuación (3.40) muestra que la fuerza total está compuesta de tres componentes: la fuerza de rozamiento seco de deslizamiento cuando las velocidades son significativas, la fuerza de rozamiento seco adhesivo a bajas velocidades y la fuerza de rozamiento viscoso. La fuerza de rozamiento seco de deslizamiento viene dada por la expresión clásica de Coulomb, mientras que la fuerza de rozamiento seco adhesivo viene dada por las expresiones de los *bristles*, que son elementos viscoelásticos en forma de pelos o cerdas actuando entre los cuerpos en colisión.

Las expresiones de las fuerzas de deslizamiento y adhesión vienen dadas por las ecuaciones (3.44) y (3.45):

$$\mathbf{F}_{slide} = \begin{cases} 0; & |\mathbf{v}_t| = 0 \\ -\mu_{din} |\mathbf{F}_n| \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|}; & |\mathbf{v}_t| > 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

$$\mathbf{F}_{stick} = \begin{cases} 0; & s = 0 \\ \frac{f_{stick}^m}{s} (\mathbf{I}_3 - \mathbf{nn}^T) (\mathbf{p}_{contact} - \mathbf{p}_{stick}); & s > 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

siendo μ_{din} el coeficiente de fricción dinámico, $s = |\mathbf{p}_{contact} - \mathbf{p}_{stick}|$ la deformación de los *bristles*, \mathbf{p}_{stick} el punto de adhesión, que inicialmente coincide con el centroide de la región de colisión en el instante en el que el contacto comenzó; \mathbf{I}_3 es la matriz de identidad de tamaño 3 x 3; f_{stick}^m es la función que representa el comportamiento de los *bristles*,

$$f_{stick}^m = -k_{stick} s - c_{stick} \dot{s} \quad (3.46)$$

siendo k_{stick} y c_{stick} los coeficientes de rigidez y amortiguamiento del modelo de adhesión. Sin embargo, hay un valor límite para la fuerza de adhesión:

$$|\mathbf{F}_{stick}| \leq \mu_{st} |\mathbf{F}_n| \quad (3.47)$$

En (3.47), μ_{st} es el coeficiente de fricción estático que en general es más elevado que el dinámico. Si se excede este límite y (3.47) no se cumple, se producen dos consecuencias: en primer lugar, la ecuación (3.46) ya no es válida para el comportamiento de los *bristles* y tiene que ser sustituida por la ecuación (3.48); en segundo lugar, el punto de adhesión debe ser actualizado con la expresión (3.49):

$$f_{stick}^m = \frac{-\mu_{st} |\mathbf{F}_n| s}{\left| (\mathbf{I}_3 - \mathbf{nn}^T) (\mathbf{p}_{contact} - \mathbf{p}_{stick}) \right|} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{p}_{stick} = \mathbf{p}_{contact} - \left(\frac{\eta_{stick} \mu_{st} |\mathbf{F}_n|}{k_{stick}} \right) \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|} \quad (3.49)$$

El coeficiente η_{stick} controla la deformación de los *bristles* cuando se alcanza la máxima fuerza. Físicamente el valor más razonable es $\eta_{stick} = 1$, pero pequeñas variaciones con $\eta_{stick} < 1$ pueden mejorar el comportamiento numérico del modelo.

Fuerza tope de ancla y caña

La naturaleza de esta fuerza tiene una forma similar a la de un muelle-amortiguador que actúa por tramos. El parámetro fundamental es el ángulo que forman las uñas del ancla con la caña. Este ángulo tiene una rotación máxima, para este caso en particular, de 30° respecto a la vertical para evitar que las uñas puedan oscilar libremente y provocar problemas en el proceso de estibado.

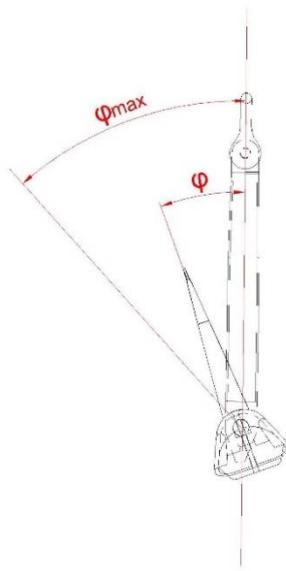


Figura 3-6. Ángulo del ancla con la caña

La expresión de la fuerza queda:

$$f_m^{lin} = \begin{cases} -k_m \cdot (\varphi - \varphi_{max}) - c_m \cdot \dot{\varphi}; & \text{si } \varphi > \varphi_{max} \\ -k_m \cdot (\varphi + \varphi_{max}) - c_m \cdot \dot{\varphi}; & \text{si } \varphi < -\varphi_{max} \\ 0 & \text{si } -\varphi_{max} < \varphi < \varphi_{max} \end{cases} \quad (3.50)$$

siendo k_m la constante elástica, c_m la constante de amortiguamiento, φ el ángulo, $\dot{\varphi}$ su derivada, φ_0 el ángulo natural y f_m la fuerza de ancla y caña.

Como se puede ver en (3.50), pueden presentarse tres casos. El primero es para $\varphi > \varphi_{m\acute{a}x}$, el segundo para $\varphi < -\varphi_{m\acute{a}x}$ y el tercero para $-\varphi_{m\acute{a}x} < \varphi < \varphi_{m\acute{a}x}$. Para este último caso la f_m será nula.



Capítulo 4

**SIMULANCLA: un software
para la simulación del
sistema de fondeo de buques**

4. SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques

Con el fin de validar la maniobra de fondeo de un buque, el software SIMULANCLA nos va a permitir realizar una simulación completa y detallada sin la necesidad de disponer de una maqueta para comprobar la maniobra en cuestión. Gracias al software, será posible definir la maniobra con una mayor similitud a la situación real. Además, también será posible visualizar la maniobra pudiendo conocer diferentes datos en tiempo real en cualquier momento.

El software SIMULANCLA permite analizar la dinámica de la maniobra basándose en la dinámica de sistemas multicuerpo, siendo ésta la disciplina en la que se han fundamentado los cálculos que se realizan para simular las maniobras de anclas.

Los métodos de la dinámica de sistemas multicuerpo son generales; no obstante, cada problema real tiene su problemática particular que puede convertirlo en un auténtico reto. En el caso de los sistemas multicuerpo resueltos por SIMULANCLA, una de las mayores dificultades estriba en los modelos de contacto establecidos entre todos los sólidos que intervienen en la simulación.

El programa SIMULANCLA consta de dos fases bien diferenciadas: la de especificación de diseño y la de simulación o visualización.

La primera fase consiste en definir paso a paso cada uno de los aspectos del sistema a simular, de una manera coherente y ordenada. Para ello, se establecen parámetros referentes al modo de funcionamiento del programa y otros parámetros físicos.

La segunda fase consiste en la visualización de la representación gráfica tridimensional del proceso de maniobra, en la que se muestra o bien la progresión de la simulación, o bien el movimiento y los valores de las fuerzas generadas durante éste en una simulación previa.



Especificar la posición individual de todos y cada uno de los elementos al inicio de la simulación sería prácticamente imposible para el usuario. Por lo tanto, solamente es necesario especificar de manera exacta los parámetros básicos de posición de la cadena y del ancla, y el resto se aproximan implícitamente a partir de éstos. Al iniciar las sesiones de simulación, es conveniente partir de una posición en la que los elementos del sistema estén en equilibrio estático, ya que la posición inicial obtenida por el programa a partir de los parámetros básicos de posición indicados por el usuario, no es una posición de equilibrio.

El programa permite calcular el estado de equilibrio, mediante un proceso previo a la simulación. Una vez obtenida la posición estática inicial, la simulación de la maniobra propiamente dicha da comienzo. La simulación termina cuando se alcance la condición de estiba del ancla, es decir, cuando la cadena quede bloqueada debido a que el ancla esté firmemente sujeta al casco del buque o a la regola. No obstante, sobre todo en los casos en los que el diseño no sea válido, puede interesar hacer simulaciones parciales más cortas y no se alcanzará dicha condición, por lo que el sistema puede no detenerse por sí mismo. Para este caso, se establece un valor máximo de la duración de la simulación, de tal manera que ésta se detenga incondicionalmente si no se llegase a la condición de estiba en ese intervalo de tiempo. Dicho intervalo de tiempo se expresa en tiempo de simulación, no en tiempo real. El tiempo final de simulación podrá ser establecido en función del tiempo que no se deba exceder en la maniobra del buque de la simulación. Se puede ajustar la magnitud y dirección de la gravedad para posibilitar que se puedan emplear ficheros de geometría que no estén orientados con respecto al eje de coordenadas por defecto del programa, que asume que el eje "Z" está orientado verticalmente y hacia arriba. El último parámetro ajustable es el valor del coeficiente de fricción, μ , con el que se puede ajustar la magnitud de las fuerzas tangenciales de rozamiento que se deriven en los posibles contactos de las piezas entre sí. Esto se puede ver a continuación en la Figura 4-1.

Defina ficheros de datos de USUARIO y MANIOBRA:

Ruta fichero usuario/maniobra y ruta ficheros CAD

Nombre fichero usuario/maniobra:

Defina el modo de funcionamiento (SIMULACIÓN/REPRODUCCIÓN):

- Simular
- Reproducir
- Simular con depuración (*sólo a petición del LIM)

Defina los parámetros básicos de la simulación:

Tiempo final de simulación (s):

Aceleración de la gravedad (m/s²): X Y Z

Iniciar simulación en posición de equilibrio

Coefficiente de fricción:

Figura 4-1. Configuración de la simulación

El primer paso para poder llevar a cabo la simulación, será desarrollar los ficheros CAD del buque que se vaya a estudiar. Se pueden diferenciar claramente dos partes en la geometría del buque, en primer lugar, se tendrán todos aquellos elementos del buque que van a intervenir directamente en la simulación (zonas de contacto del casco, escobén, cadena y ancla); por otra banda, se tendrán el resto de componentes del buque, es decir, lo que será la geometría auxiliar en términos de simulación, pues su presencia no va a variar los resultados de la simulación. De este modo, el programa necesitará que se le proporcionen los siguientes ficheros CAD:

- Fichero que contenga la geometría colisionable del casco.
- Fichero que contenga la geometría de la regola/escobén.
- Fichero que contenga la geometría auxiliar que se desea visualizar en la simulación pero que no participa en los cálculos dinámicos.

Los formatos de geometría que el programa es capaz de manejar son diversos, pero principalmente se dividen en dos categorías: de malla y de superficie.

Los ficheros de malla almacenan la representación geométrica de un objeto tridimensional como conjuntos de pequeñas facetas planas, poligonales, aunque



SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques

generalmente se trata de elementos triangulares. Este tipo de ficheros es sencillo de interpretar, y se asemeja mucho a la forma con la que el programa opera finalmente. No obstante, esta representación es una aproximación de la forma real del objeto representado, y de ello se deriva que su bondad dependa de la resolución y corrección del mallado con la que se generó. En las regiones de superficie más complejas, es necesario que los elementos de la malla estén dimensionados correctamente, puesto que influyen directamente en la calidad de los resultados obtenidos. El usuario debe garantizar que las mallas que introduce presenten una calidad mínima.

Los ficheros de superficie almacenan la geometría de cada uno de los objetos como la unión de varias superficies paramétricas. La principal ventaja de los formatos de superficie consiste en que su precisión no depende de la elección de un parámetro de resolución o tamaño de elemento. Obviamente, dichas superficies también constituyen una aproximación al objeto real, pero se definen mediante un conjunto muy reducido de parámetros, y son capaces de representar de manera exacta cierto tipo de superficies muy comunes.

En esta fase el usuario debe especificar tres puntos básicos para la situación inicial de la cadena: uno tangente al molinete, otro en el centro de entrada de la regola de cubierta y, por último, el del centro de la salida de la regola de forro. El punto de tiro tangente al molinete, es el punto en la circunferencia del molinete donde la cadena es enrollada por el sistema de recogida. Las coordenadas de entrada de la regola de cubierta definen el punto de entrada al escobén en la regola de cubierta, que debe estar centrado en la prolongación del cilindro del escobén y ligeramente por encima de la cubierta del buque, para que la cadena en la posición inicial no colisione con el buque. Este es uno de los puntos que se toma como aproximados, ya que la posición de la cadena, tomando las consideraciones de contacto y peso propio de la misma, es en principio desconocida. El ya descrito proceso de determinación del equilibrio inicial permite calcular la posición exacta antes de comenzar la simulación. Finalmente, el usuario debe indicar las coordenadas de salida de la regola de forro, es decir, el punto de salida del escobén en la regola de forro. Debe estar centrado en la prolongación del cilindro

SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques del escobén y ligeramente fuera de la regola de forro, para que la cadena en la posición inicial no colisione con el buque.

Introduzca los datos del BUQUE:

Fichero CAD casco:	casco003.obj				
Fichero CAD regolas/escoben:	regola_F105_MEF.obj				
Fichero CAD auxiliar (geom. no colisionable):	resto_casco2.obj				
Desplazamiento global de las regolas/escoben (m):					
X	0.00000	Y	0.00000	Z	0.00000
Rotación de las regolas/escoben alrededor del plano del casco (deg):					
Angle°	0.000				
Coordenadas globales del punto de tiro tangente al molinete (m):					
X	121.4700	Y	-1.43600	Z	11.93200
Coordenadas locales de entrada de la regola de cubierta (m):					
X	129.8610	Y	-0.91800	Z	12.67500
Coordenadas locales de salida de la regola de forro (m):					
X	131.5810	Y	-3.10600	Z	9.45500

Figura 4-2. Configuración del buque

El siguiente paso será proporcionar la geometría de los elementos móviles. Se trata de la caña del ancla, el ancla, los eslabones de la cadena, el grillete y, además, algunos datos necesarios del molinete. Estos objetos se clasifican en dos tipos principales: genéricos y paramétricos. Los objetos genéricos también se definen mediante ficheros de malla o superficie. Sin embargo, dado que son objetos móviles, es necesario conocer una serie de parámetros adicionales para introducirlos. Dichos parámetros son: la masa, el centro de gravedad, y el tensor de inercia de cada una de las piezas. La mayoría de los programas de CAD son capaces de suministrar estos datos, pero de no ser así, el programa es capaz de calcularlos por sí mismo a través de las mallas que representan a los objetos, como se puede ver en la Figura 4-3.



Los valores calculados automáticamente son

Masa: 2112.93 kg

Centro de masas:

4.14627e-07	-3.10966e-07	1.32356
-------------	--------------	---------

Momentos principales de inercia:

1857.63	1849.21	30.3644
---------	---------	---------

Productos de inercia:

-2.48939e-05	-2.48939e-05	0.00633999
--------------	--------------	------------

◆ Desea incorporar estos valores a la ficha?

Figura 4-3. Cálculo de las características del elemento

El primero de los objetos móviles a definir es la caña del ancla, como se puede ver en la Figura 4-4. Debe estar acondicionada de tal manera que una de las articulaciones coincida con el centro de su sistema de coordenadas local, en el que la geometría está definida. Se deben suministrar adicionalmente las coordenadas de la articulación del otro extremo, de tal manera que sus dimensiones queden implícitamente determinadas. La definición del ancla se completa con el siguiente formulario, en el que se piden los datos de las uñas de la misma. La geometría tiene que venir dada mediante un fichero de CAD de malla o superficie, del cual se puedan extraer las propiedades físicas de masa, o bien introducirlas manualmente.

La geometría de las uñas, al igual que en el caso de la caña, tiene que estar expresada en un sistema de coordenadas establecido previamente. Es necesario determinar otra serie de parámetros adicionales para definir el movimiento entre estas dos piezas. El ángulo tope entre caña y ancla es el ángulo máximo de giro para el que el ancla hace tope con la caña, lo cual influye directamente en las posiciones de estiba que se adopten finalmente. El ángulo inicial entre caña y ancla es el ángulo inicial que forman ambas piezas antes de empezar la simulación. Dependiendo del ángulo elegido, las uñas caen hacia adelante o hacia atrás de la caña, por lo que se puede simular escenarios en los que una posición particular de inicio en la configuración del ancla pueda ser desfavorable. El diálogo correspondiente se puede observar en la Figura 4-5.

Introduzca los datos de la CAÑA del ancla:

Masa (kg): canha_MEF.obj

Centro de masas (m):
 Xcdm Ycdm Zcdm

Tensor de inercia en el CDM del sólido (kg·m²):
 Ixx Iyy Izz
 Pxy Pxz Pyz

Coordenadas locales de la articulación con el grillete de la cadena (m):
 Xj Yj Zj

Coordenadas locales de la articulación con el ancla (m):
 Xj Yj Zj

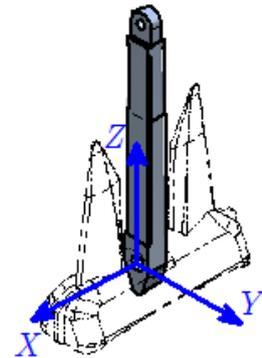


Figura 4-4. Configuración de la caña

Introduzca los datos del ANCLA:

Masa (kg): anda_MEF.obj

Centro de masas (m):
 Xcdm Ycdm Zcdm

Tensor de inercia en el CDM del sólido (kg·m²):
 Ixx Iyy Izz
 Pxy Pxz Pyz

Coordenadas locales de la articulación con la caña (m):
 Xj Yj Zj

Ángulo tope entre ancla y caña (deg):

Ángulo inicial entre ancla y caña (deg):

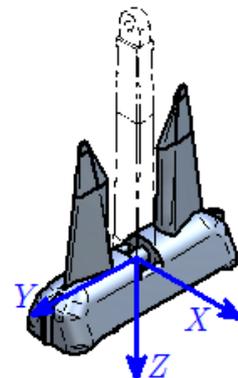


Figura 4-5. Configuración del ancla



SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques

El resto de elementos, tales como los eslabones o el molinete, no será necesario proporcionar ningún fichero; pues simplemente habrá que configurar los distintos parámetros que se solicitan y el propio software los combina con el resto de la geometría proporcionada.

Los eslabones se agrupan en el conjunto de los objetos paramétricos anteriormente mencionados. Este tipo de elementos posee una geometría y características conocidas, por tratarse de elementos cuyas dimensiones están normalizadas según la *International Standard ISO 1704 (1973)*. El parámetro que define a cada uno de los eslabones, a parte de su tipo, que determina su geometría, es el diámetro de la cadena. Este es el diámetro del alambre con el que está fabricado el eslabón de referencia tipo 5.1 (Common link). Todas las medidas de los eslabones están parametrizadas en función de este diámetro.

En cuanto al grillete, si será necesario proporcionar el fichero CAD correspondiente, pues, aunque no es necesaria la geometría del molinete, la geometría del grillete si va a influir en el comportamiento de la cadena. En el caso del molinete, se caracteriza mediante la fuerza máxima de tiro que puede desarrollar el motor, y la velocidad lineal de tiro del molinete. Ambos valores sirven para que el programa pueda simular el comportamiento del motor, es decir, tratar de alcanzar la velocidad de tiro especificada, pero sin superar nunca la fuerza máxima, que representa la potencia máxima que puede entregar el propio motor.

Introduzca los datos de la CADENA:

Tipo y número de eslabones:

1	End Shackle	1
2	End Link	1
3	Enlarged Link	1
4	Common Link	50
5	Kenter Link	1
6	Common Link	1
7	Enlarged Link	1
8	Swivel	1
9	Enlarged Link	1
10	Common Link	1
11	Kenter Link	1
12	Common Link	0
13	Common Link	0
14	Common Link	0
15	Common Link	0

Diámetro de la cadena (mm):

Ángulo inicial en grados (deg) para los eslabones pivote (swivel link):

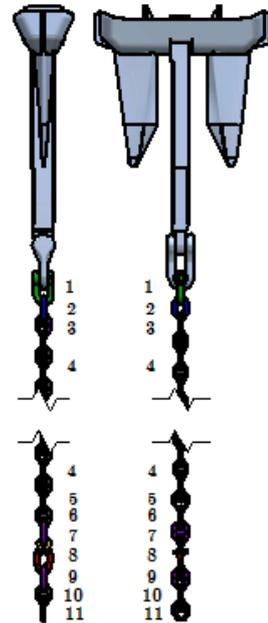


Figura 4-6. Configuración de la cadena

Introduzca los datos del GRILLETE de unión del ancla con la cadena:

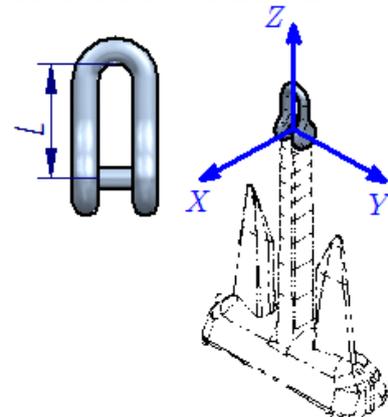
Fichero CAD grillete: grillete_F105_MEF.obj

Tensor de inercia en el CDM del grillete (kg·m²):

Ixx 24.57070 Iyy 20.77530 Izz 6.09469

Masa (kg): 266.43 Altura del centro de masas (m): 0.15217 Longitud interior del grillete, L (m): 0.55000

Zcdm



Introduzca los datos del MOLINETE:

Fuerza máxima de tiro del molinete (N):

Velocidad lineal de tiro del molinete (m/s):

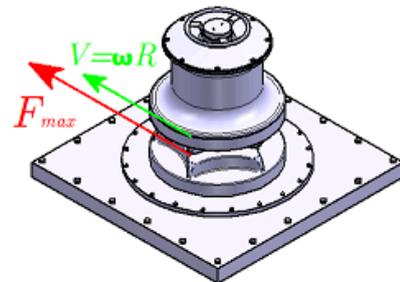


Figura 4-7. Configuración del grillete y el molinete



SIMULANCLA: un software para la simulación del sistema de fondeo de buques

Una vez estén proporcionados los datos necesarios, el programa lee los parámetros de diseño del fichero de usuario y lanza la simulación. A medida que se computa el estado del sistema en cada instante de tiempo, se representan gráficamente los elementos del sistema de fondeo de tal manera que el usuario pueda observar si el sistema se ajusta a los requerimientos antes de que la simulación termine.

En el curso de la simulación, se representan gráficamente los valores de magnitudes físicas de interés: las fuerzas derivadas del contacto y la fuerza de tiro del motor de recogida. Las fuerzas de contacto se representan como flechas verdes, de longitud proporcional a su magnitud, y con origen en cada uno de los puntos de contacto. Se trata de la fuerza de reacción entre un par de elementos. Asociada a éstas se encuentran las indicaciones de fuerzas de rozamiento, que se representan como flechas rojas con el origen común a su fuerza de contacto asociada. La fuerza de tiro se representa con una flecha azul, y de manera similar, se indica su valor numérico. Por último, la pantalla de gráficos admite varias modalidades de visualización, como la vista de rejilla en la que se puede ver directamente la estructura de las mallas de todos los objetos. En la Figura 4-8 y Figura 4-9 se muestran estos detalles

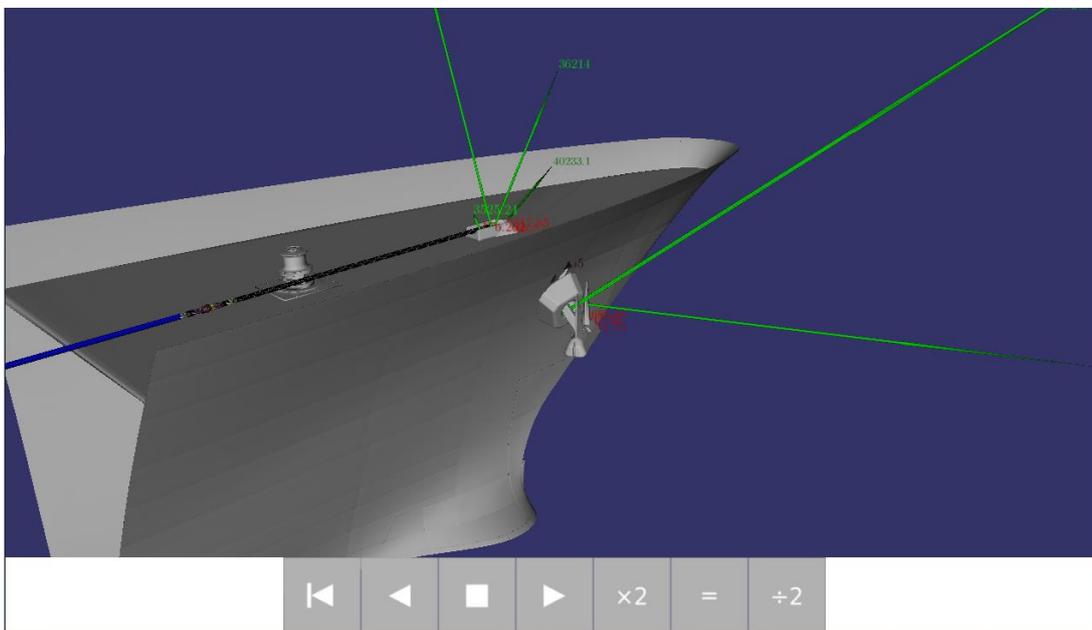


Figura 4-8. Fuerzas representadas en la simulación

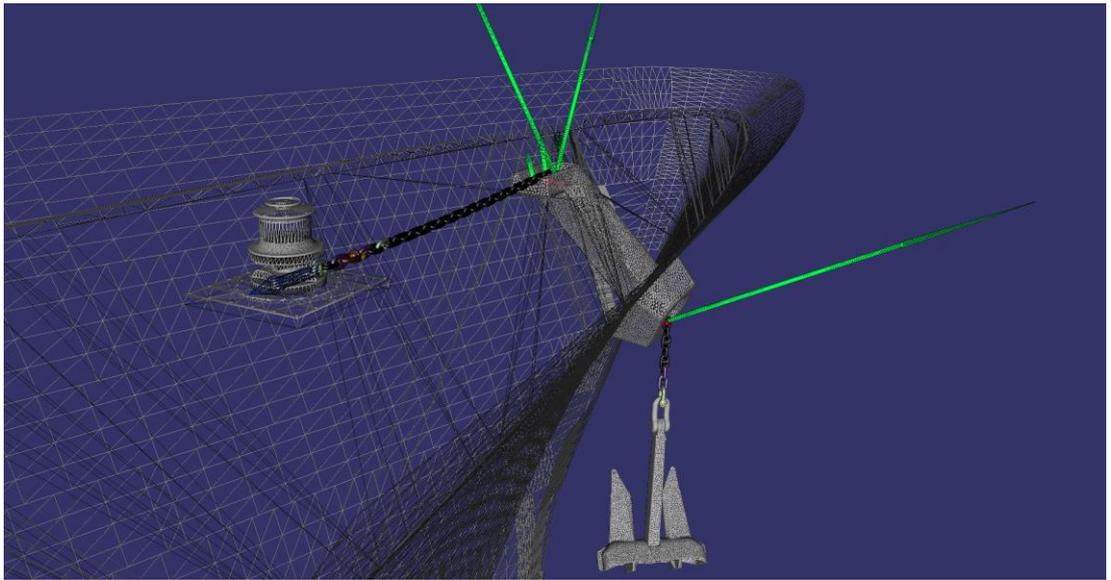


Figura 4-9. Estructura de malla

Capítulo 5

Simulación de la maniobra de anclas del buque diseñado

5. Simulación de la maniobra de anclas del buque diseñado

En la simulación de la maniobra, se va a conocer la dinámica del ancla para el buque que se ha diseñado. De este modo, se podrá comprobar cómo se comporta y la aptitud del diseño de los distintos elementos del buque. Es preciso destacar la influencia del diseño del escobén, así como la configuración de la cadena, en el comportamiento del ancla. De la misma manera, es necesario supervisar cómo se integra el diseño del casco, pues en el movimiento del ancla se suceden interacciones entre ambos elementos que influyen en el comportamiento del sistema y en cómo se desarrolla el movimiento.

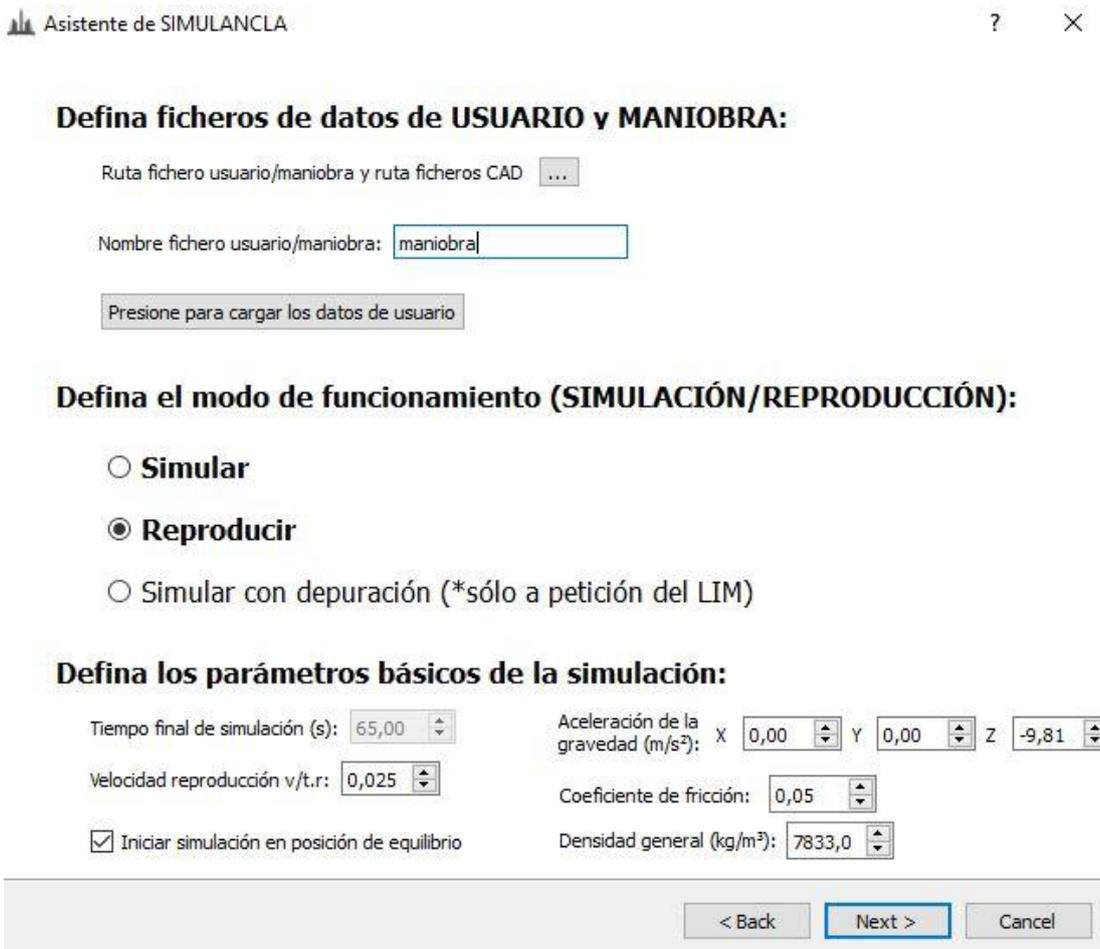
Para ver si un diseño es aceptable y no necesita más modificaciones, los ingenieros a cargo del diseño se fijan en varias cosas: se mira que el ancla quede correctamente acomodada en la regala/casco y que los puntos de contacto que se producen den como resultado una posición estable con fuerzas de contacto suficientes; se mira también que los puntos de contacto de la cadena sean los previstos en el diseño y que las fuerzas de contacto de la cadena no sean excesivas; finalmente se mira que por supuesto el ancla no se atasque en la subida, situación que haría que la simulación se detuviera antes.

Otra posibilidad para comprobar la eficacia del software y de los resultados obtenidos, sería realizando una simulación con el modelo en medidas a escala. Esta simulación se podría comparar con los resultados obtenidos en una maqueta fabricada en la misma escala, lo que va a permitir realizar una verificación y validación del software muy eficaz. Del mismo modo, la simulación en tamaño real permitirá comprobar la similitud con la simulación a escala, observando si se producen modificaciones en el comportamiento del sistema con unas medidas y parámetros diferentes, tales como masas, momentos de inercia, centros de gravedad, etc. Al escalar el modelo, todas estas variables (masas, momentos de inercia, centros de gravedad, etc) van a sufrir cambios de magnitud importantes, lo que plantea una situación que requiere una adaptación del desarrollo mostrado en el apartado 3 sobre *La dinámica de sistemas multicuerpo*. Esta

posibilidad deja abierta una interesante línea de trabajo para seguir desarrollando el software, aunque por su magnitud se desvía del ámbito de este proyecto.

5.1. Configuración de la simulación

Para llevar a cabo la simulación, será necesario configurar la maniobra para el buque en cuestión. Los primeros parámetros a indicar serán el tiempo final de simulación (en caso de que no se logre la condición de estiba), la dirección en la que actúa la gravedad y el coeficiente de fricción. Para la maniobra de éste buque, los parámetros mencionados son los que se incluyen en la Figura 5-1.



Asistente de SIMULANCLA

Defina ficheros de datos de USUARIO y MANIOBRA:

Ruta fichero usuario/maniobra y ruta ficheros CAD ...

Nombre fichero usuario/maniobra:

Presione para cargar los datos de usuario

Defina el modo de funcionamiento (SIMULACIÓN/REPRODUCCIÓN):

Simular

Reproducir

Simular con depuración (*sólo a petición del LIM)

Defina los parámetros básicos de la simulación:

Tiempo final de simulación (s):

Velocidad reproducción v/t.r.:

Iniciar simulación en posición de equilibrio

Aceleración de la gravedad (m/s²): X Y Z

Coeficiente de fricción:

Densidad general (kg/m³):

< Back Next > Cancel

Figura 5-1. Parámetros de simulación

El siguiente paso será proporcionar los ficheros CAD que representan el casco del buque. Como ya se ha visto, se cargarán los datos correspondientes a la zona del casco susceptible de contactos con el ancla, el fichero de la regala o escobén, así como el resto de geometría que se desee visualizar en la simulación y que no tiene influencia en los cálculos. Se podrá desplazar o rotar la regala/escobén de su posición, aunque en este caso no será necesario al estar perfectamente definida su posición en los ficheros CAD creados; sin embargo, de ser necesario aplicar algún cambio en su posicionamiento para modificar el comportamiento del sistema, podría realizarse aquí directamente. Los últimos datos del buque a proporcionar serán aquellos puntos necesarios para que sea posible ubicar correctamente la cadena y configurar su paso. Para ello habrá que calcular la posición del punto de tiro tangente al molinete, el punto de entrada de la regala de cubierta y el punto de salida de la regala de forro. Para ésta maniobra, los parámetros mencionados se incluyen en la Figura 5-2.

 Asistente de SIMULANCLA ? X

Introduzca los datos del BUQUE:

Fichero CAD casco:  :casco colisionable.obj

Fichero CAD regalas/escobén:  >p/Simulacion/Escoben.obj

Fichero CAD auxiliar (geom. no colision):  <top/Simulacion/Casco auxiliar.obj

Desplazamiento global de las regalas/escobén (m):

X Y Z

Rotación de las regalas/escobén alrededor del plano del casco (deg):

Angle°

Coordenadas globales del punto de tiro tangente al molinete (m):

X Y Z

Coordenadas locales de entrada de la regala de cubierta (m):

X Y Z

Coordenadas locales de salida de la regala de forro (m):

X Y Z

Figura 5-2. Datos del buque

A continuación, se detallarán los parámetros correspondientes a la caña del ancla. Primero se añadirá el fichero CAD correspondiente. Los parámetros correspondientes a la masa, el centro de masas y el tensor de inercia en el centro de masas son calculados por el programa a partir del fichero proporcionado. Si habrá que definir los puntos correspondientes a la articulación con el grillete de la cadena y a la articulación con el ancla. Para ésta maniobra, los parámetros citados se indican en la Figura 5-3.

Asistente de SIMULANCLA ? X

Introduzca los datos de la CAÑA del ancla:

Masa (kg): Fichero CAD caña: Densidad (kg/m³)

Centro de masas (m):
 Xcdm Ycdm Zcdm

Tensor de inercia en el CDM del sólido (kg·m²):
 Ixx Iyy Izz
 Pxy Pxz Pzy

Coordenadas locales de la articulación con el grillete de la cadena (m):
 Xj Yj Zj

Coordenadas locales de la articulación con el ancla (m):
 Xj Yj Zj

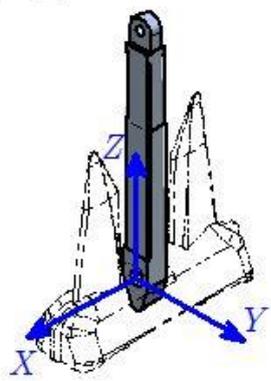


Figura 5-3. Datos caña

Una vez configurada la caña, habrá que definir las uñas del ancla. Igualmente que con la caña, se proporcionará el fichero CAD de las uñas. Los datos referentes a la masa, el centro de masas y el tensor de inercia en el centro de masas los calcula el propio programa. Habrá que especificar el punto de articulación de las uñas con la caña, así como el ángulo inicial de las uñas con la propia caña y el ángulo máximo que podrán

formar según la naturaleza de la articulación. Para ésta maniobra, los parámetros citados se indican en la Figura 5-4.

Asistente de SIMULANCLA ? X

Introduzca los datos de las uñas del ANCLA:

Masa (kg): Fichero CAD anda: Densidad (kg/m³)

Centro de masas (m):
 Xcdm Ycdm Zcdm

Tensor de inercia en el CDM del sólido (kg·m²):
 Ixx Iyy Izz
 Pxy Pxz Pzy

Coordenadas locales de la articulación con la caña (m):
 Xj Yj Zj

Ángulo tope entre uñas y caña (deg):

Ángulo inicial entre uñas y caña (deg):

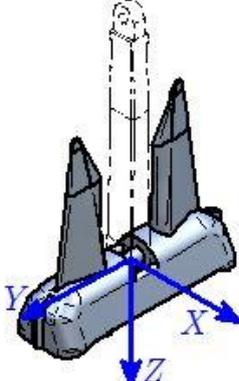


Figura 5-4. Datos ancla

El siguiente paso del asistente permite la configuración de la cadena. Para ello habrá que ir estableciendo el orden de los distintos eslabones que se deseen emplear. El parámetro fundamental es el diámetro de alambre y el tipo de eslabones definidos por tramos. El diámetro del alambre determina el tamaño de los eslabones empleados. Para ésta maniobra, los parámetros citados se indican en la Figura 5-5.

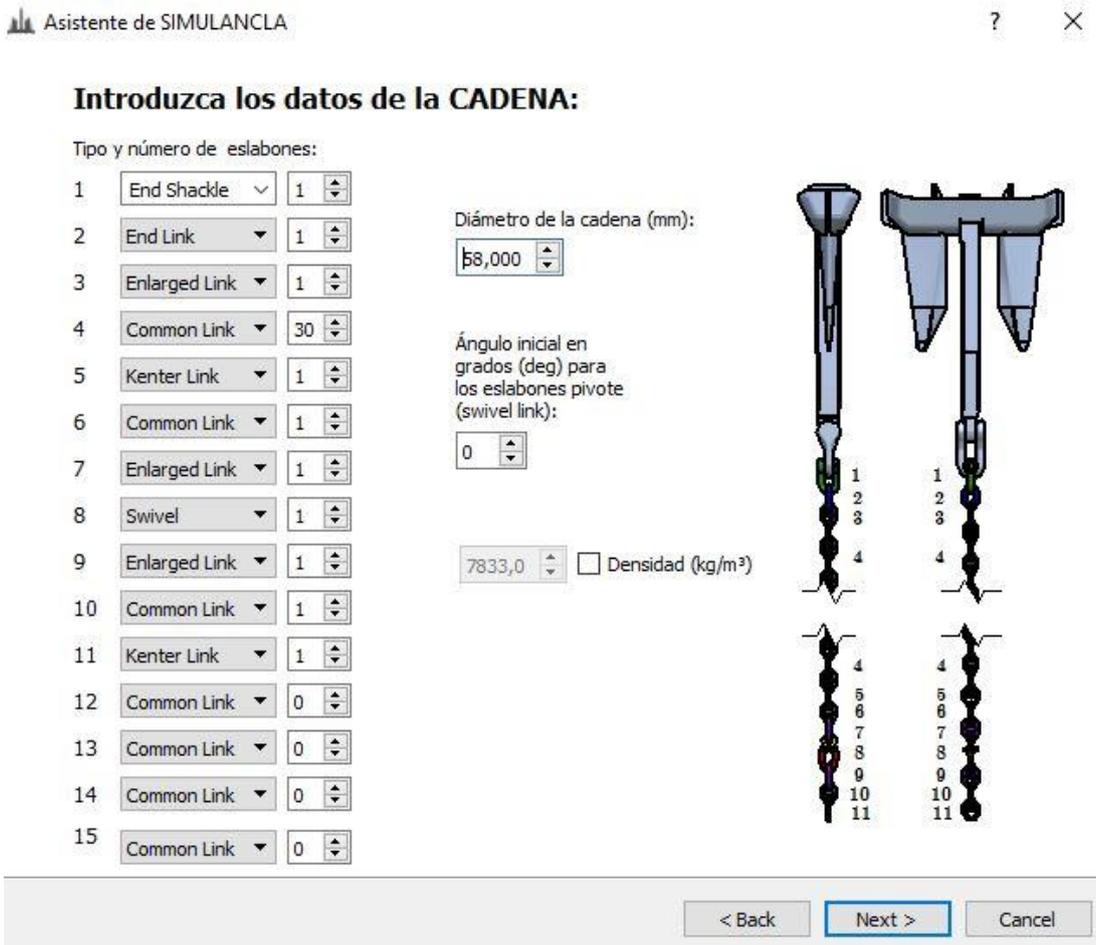


Figura 5-5. Datos de la cadena

Por último, se realizará la configuración del grillete y del molinete. Será necesario establecer la fuerza máxima de tiro, que servirá para que el programa detecte la posición de estiba del ancla; así como la velocidad lineal de tiro adecuada para el correcto funcionamiento del sistema. Para ésta maniobra, los parámetros citados se indican en la Figura 5-6.

Asistente de SIMULANCLA ? X

Introduzca los datos del GRILLETE de unión del ancla con la cadena:

Fichero CAD grillete: 105/grillete_F105_MEF.obj

7833,0 Densidad (kg/m³)

Tensor de inercia en el CDM del grillete (kg·m²):

Ixx 18,40100 Iyy 14,60600 Izz 6,09500

Masa (kg): Altura del centro de masas (m): Longitud interior del grillete, L (m):

Introduzca los datos del MOLINETE:

Fuerza máxima de tiro del molinete (N):

Velocidad lineal de tiro del molinete (m/s):

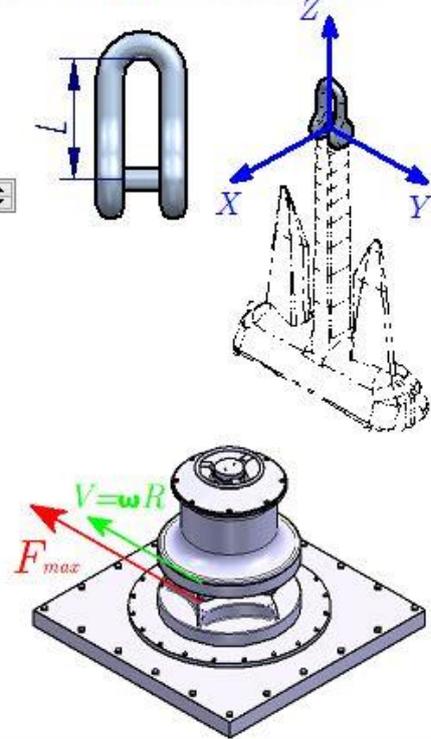


Figura 5-6. Datos del grillete y el molinete

5.2. Resultados de la simulación

Una vez configurada la simulación, se podrá dar inicio a la misma para obtener el resultado de la maniobra. El software es completamente general y capaz de simular cualquier geometría que venga expresada mediante ficheros de CAD. Una vez simulada la maniobra completa es posible obtener datos precisos de todas las fuerzas de contacto entre la cadena y el casco, las fuerzas de contacto entre el ancla y el casco y la fuerza de tiro en el extremo de la cadena recibida desde el molinete.



En primer lugar, lo más oportuno es iniciar una simulación sin la posición de equilibrio marcada en el asistente de configuración. De este modo, los distintos elementos estarán colocados en función de los datos proporcionados. Así se podrá comprobar que el punto de tiro del molinete, el punto de entrada al escobén y el punto de salida están correctamente definidos para evitar problemas en la operación de simulación completa. En la Figura 5-7 se puede observar la colocación para los valores aportados. Una vez que todos los puntos hayan sido verificados, se podrá realizar una simulación iniciando desde la posición de equilibrio. En la Figura 5-8 se puede visualizar esta posición.

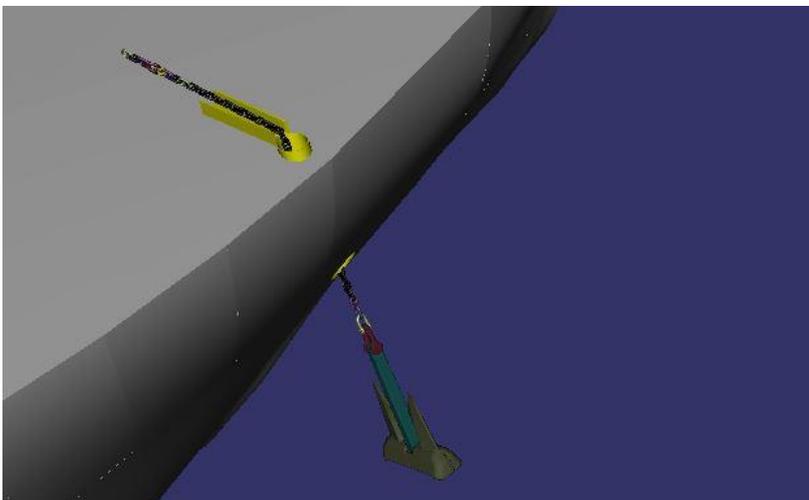


Figura 5-7. Posición inicial

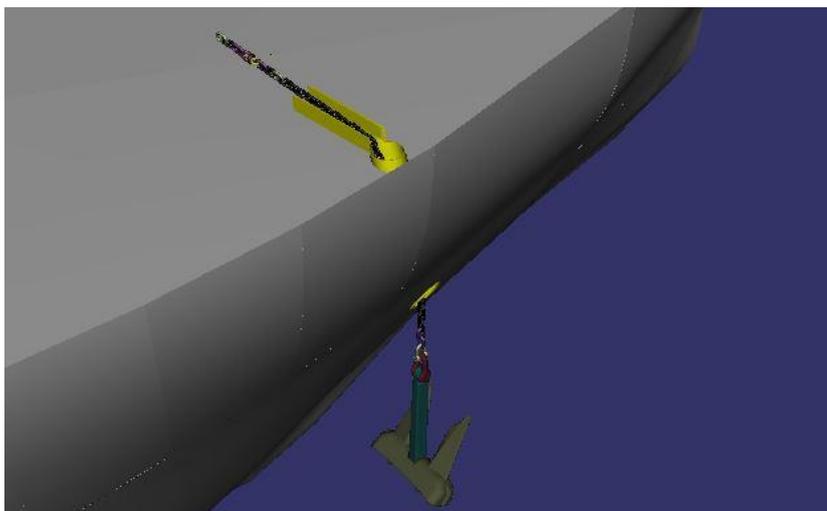


Figura 5-8. Posición de equilibrio

En la simulación desde la posición de equilibrio, al mostrarse la ventana gráfica de visualización, se pulsará el botón de avance para dar comienzo a la maniobra. Todos los datos se van almacenando en cada instante de tiempo, por lo que se podrá retroceder siempre que se desee para verificar el proceso en cualquier momento. Tras realizar las verificaciones que el usuario haya elegido, es posible volver al instante en el que se encuentra la simulación, retomando el último estado calculado.



Figura 5-9. Cuadro de control de la simulación

Para cada instante se pueden visualizar las fuerzas de contacto, representadas en verde; las fuerzas de rozamiento, representadas en rojo; y la fuerza de tiro de la cadena, representada en azul. La longitud de las distintas flechas será proporcional al valor que tomen en cada instante de tiempo. En la Figura 5-10 se puede ver un ejemplo.

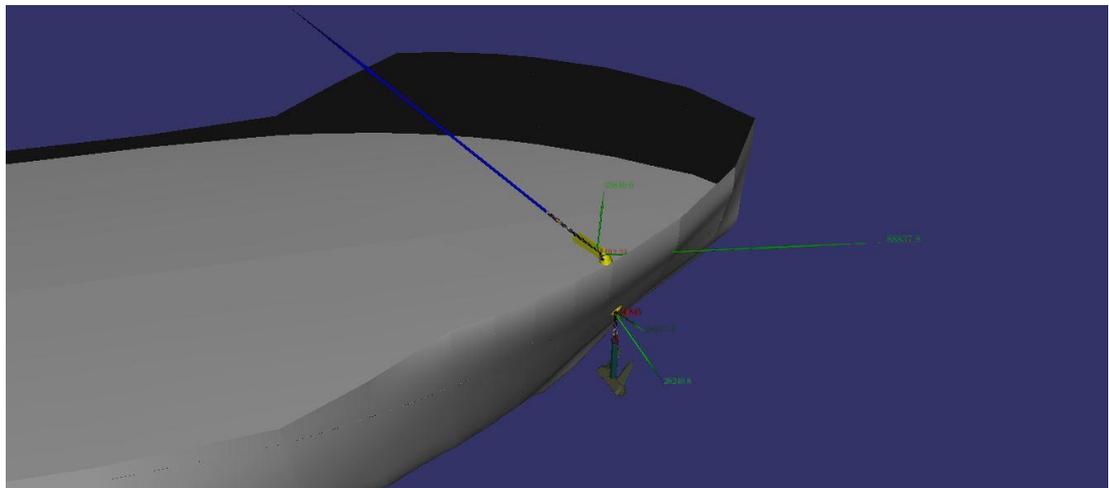


Figura 5-10. Fuerzas en la simulación

En el caso de este buque, como las simulaciones se llevan a cabo en fase de diseño, el software permite ver, antes de fabricar ninguna pieza, si las ubicaciones de la regola, escobén y molinete en el casco son correctas o por el contrario es necesario hacer algún cambio en los planos y volver a simular para verificar si estos cambios se ajustan a las especificaciones de diseño.

Una vez finalizada la simulación se generará un archivo con el que podremos reproducir la maniobra y realizar su análisis. Como ya se ha citado, será fundamental comprobar los siguientes aspectos:

- El ancla está correctamente acomodada en la regola/casco y los puntos de contacto que se producen dan como resultado una posición estable con fuerzas de contacto suficientes.
- Los puntos de contacto de la cadena son aptos y las fuerzas de contacto de la cadena no son excesivas.
- El ancla no se atasca en la subida logrando alcanzar la posición de estiba.

También se analizará la posición del ancla a lo largo de la maniobra, la velocidad de tiro, la recogida de cadena y la fuerza de tiro ejercida por el molinete.

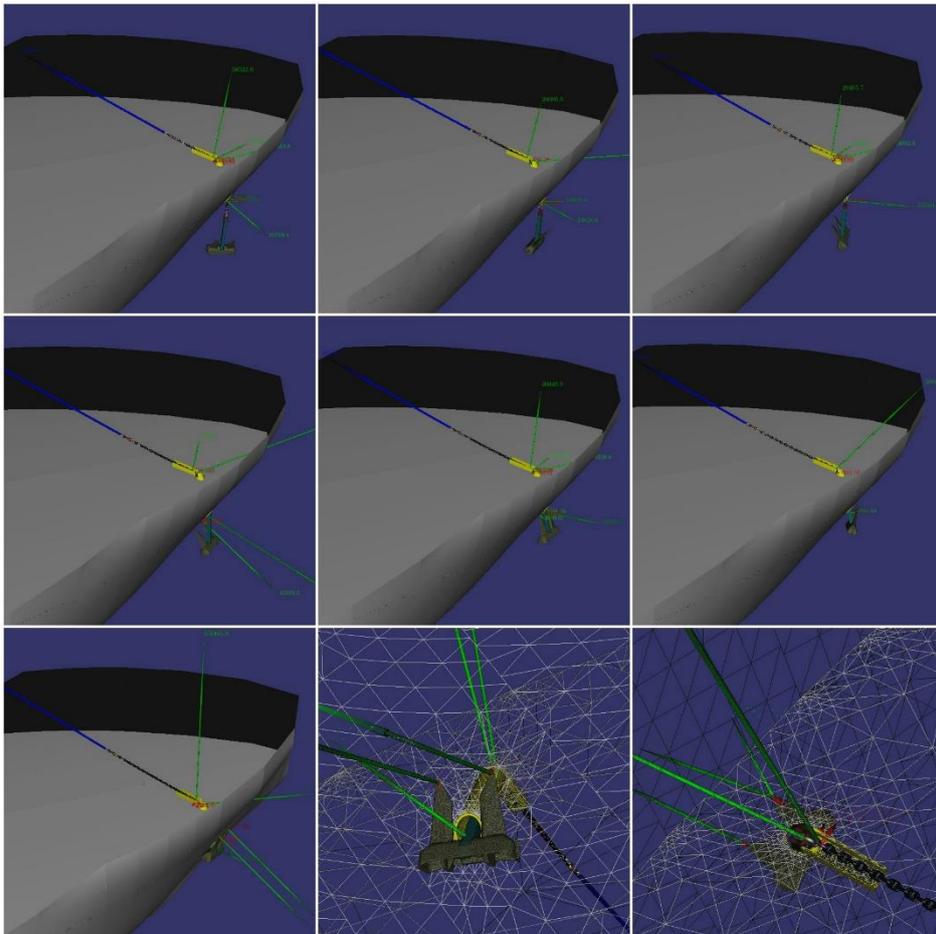


Figura 5-11. Evolución de la simulación

Antes de analizar los resultados, en la Figura 5-11 se pueden comprobar distintos estados de la simulación que nos muestran cómo se desarrolla y la posición del ancla una vez finalizada.

En primer lugar, comprobando la simulación se puede verificar que el ancla queda correctamente acomodada en el escobén y con las uñas bien acopladas al casco, como se puede apreciar en la Figura 5-12. La simulación ha concluido sin error, obteniendo una posición final estable tras alcanzarse la condición establecida de llegar a una velocidad de tiro nula.

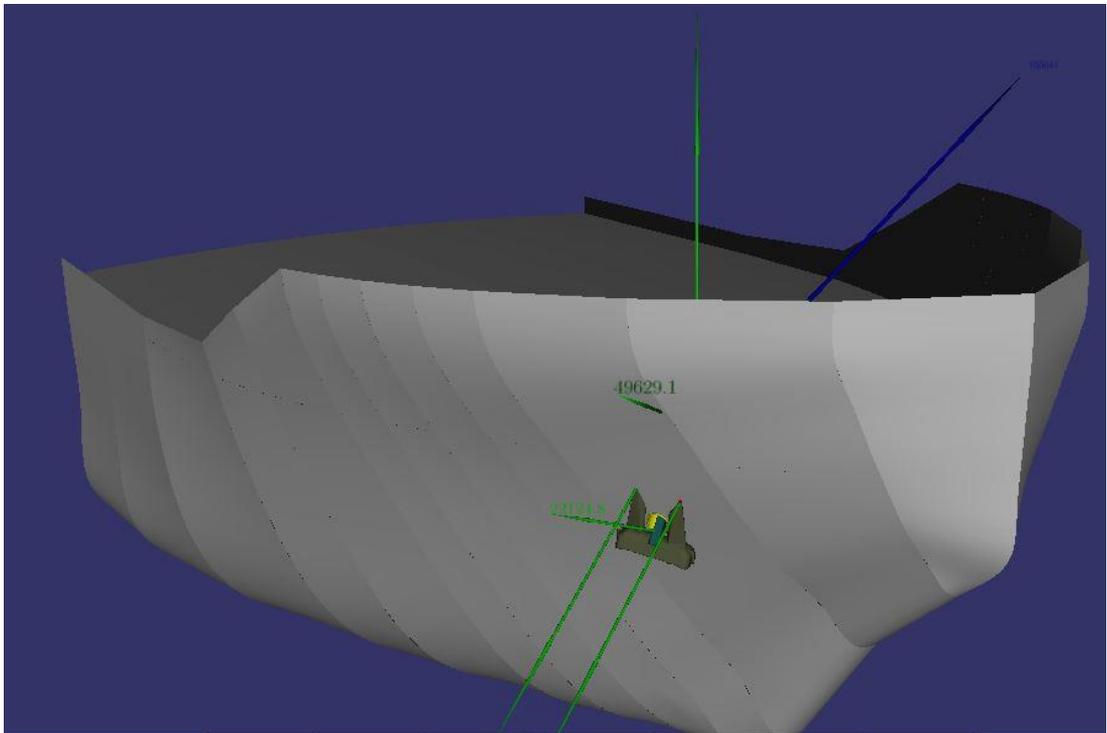


Figura 5-12. Posición de estiba

En cuanto a los puntos de contacto de la cadena, durante la simulación se registran en las zonas esperadas, es decir, en el punto de entrada y salida del escobén. Obviamente se produce algún otro contacto totalmente normal derivado del movimiento del sistema, pero todos ellos se producen sin alterar la maniobra. Es preciso indicar que cuando el ancla entra en el escobén, las uñas generan contactos en el casco para ir adoptando su posición final rotando sobre la caña.



También se puede afirmar que el ancla no se atasca, pues verificando la maniobra no se registran dificultades en la inserción del ancla en el escobén y llega a estibar correctamente. Por lo tanto, la posición de estiba alcanzada es muy satisfactoria.

En referencia a la posición del ancla durante la maniobra, se puede observar cómo se producen algunas rotaciones en la misma a lo largo de la recogida de la cadena. Estas rotaciones vienen motivadas por la presencia de un *swivel* (eslabón giratorio) cerca del grillete de unión con la caña, con el fin de evitar que se pueda retorcer la cadena. De este modo, la cadena podrá transcurrir fácilmente por el escobén. En la Figura 5-13 se puede observar la variación de la posición.

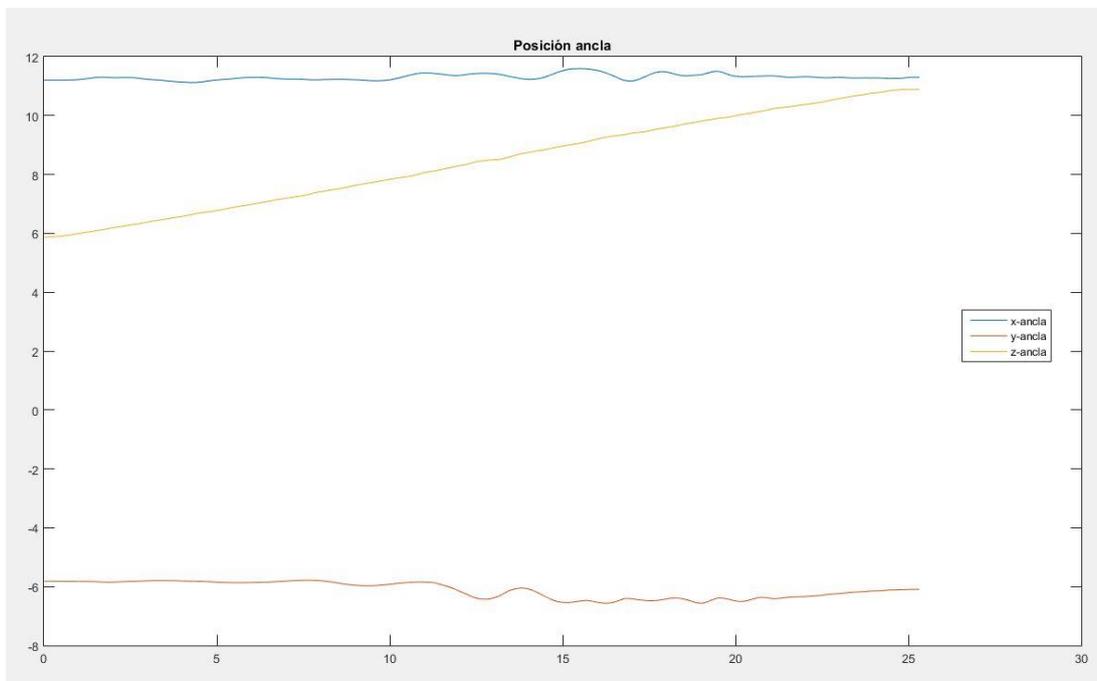


Figura 5-13. Posición ancla

Observando la velocidad de tiro, se puede observar como esta es prácticamente constante durante toda la maniobra, produciéndose alguna reducción pequeña de la misma en varios puntos que vienen motivadas por el aumento de algún rozamiento durante la maniobra. La constancia en la velocidad es una clara prueba de que la maniobra lograda con este diseño y estos elementos es muy satisfactoria. En la Figura 5-14 se puede observar su variación.

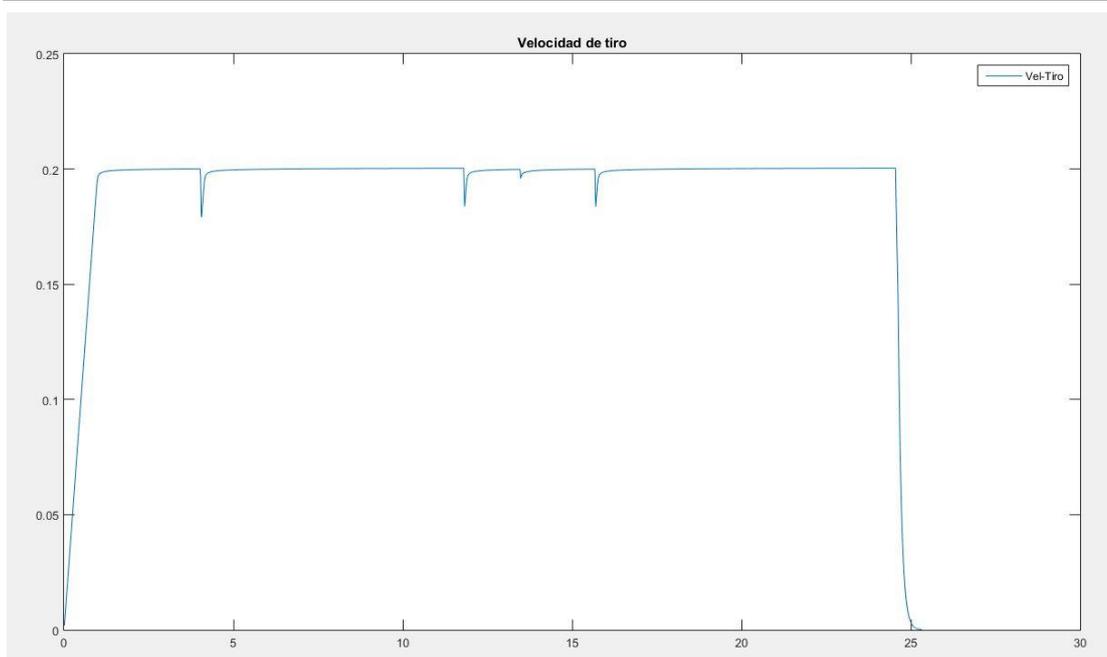


Figura 5-14. Velocidad de tiro

La recogida de cadena se puede comprobar en la Figura 5-15 que es lineal a lo largo de la maniobra. Esto está motivado por la velocidad de tiro prácticamente constante.

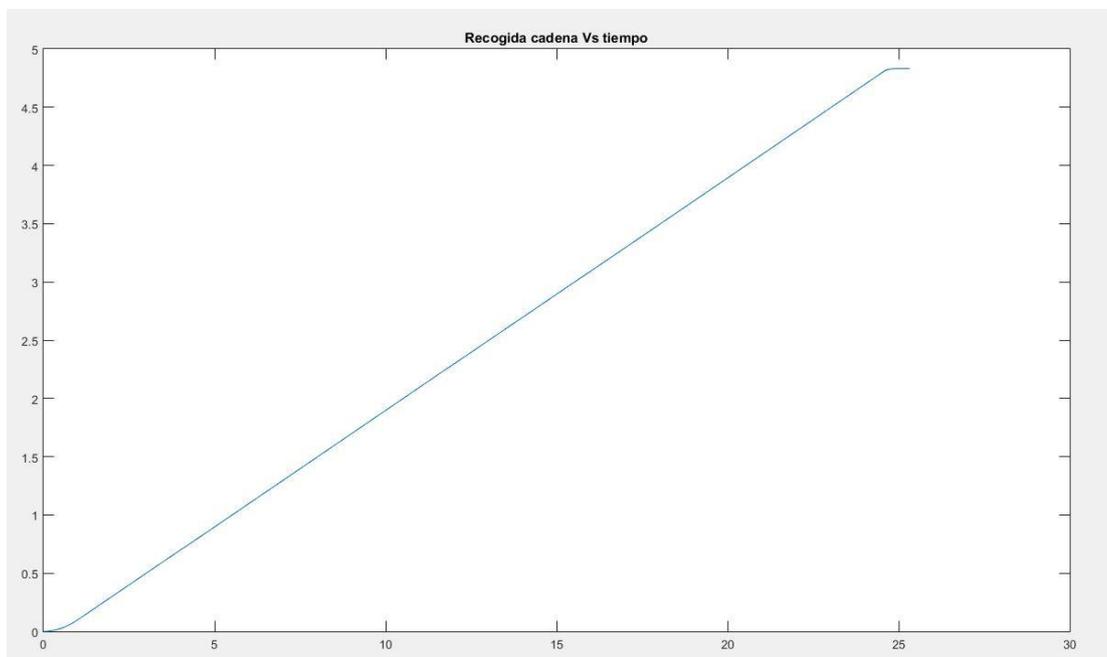


Figura 5-15. Recogida cadena



Simulación de la maniobra de anclas del buque diseñado

Por último, visualizando la fuerza del molinete se pueden comprobar las oscilaciones que se van produciendo al paso de los eslabones por el punto de tiro. Obviamente esta va aumentando según el ancla se va adentrando en el escobén y reduciéndose la velocidad de tiro. En la Figura 5-16 se puede observar su variación.

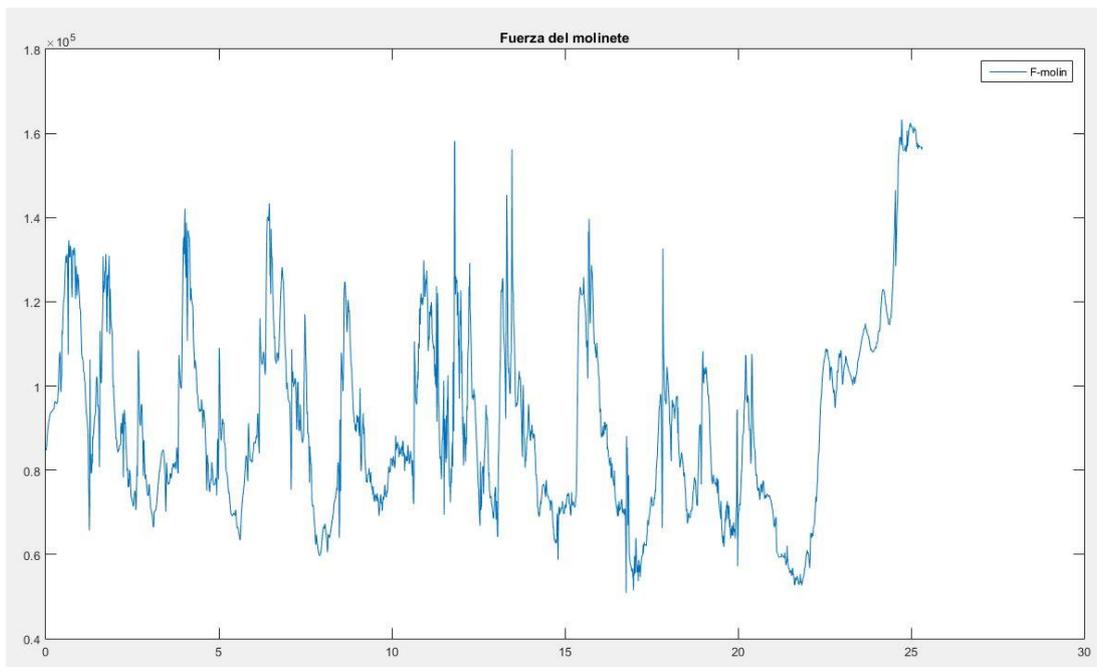


Figura 5-16. Fuerza del molinete

Capítulo 6

Fabricación y simulación del modelo a escala

6. Fabricación y simulación del modelo a escala

Anteriormente se ha realizado una simulación del buque a tamaño real. Con el fin de poder comparar el software con una maqueta, sería de gran interés realizar una simulación del modelo a escala. De este modo se podrá comprobar la semejanza de un modelo a escala con el de tamaño real y el comportamiento de los elementos en una maqueta frente al obtenido en una simulación. Con el fin de poder abordar estos objetivos en el futuro, con este trabajo se han podido preparar las bases para abordar esta línea de trabajo. Para ello ha sido necesario realizar un importante trabajo en el código del software para poder adaptarlo a este estudio. Una maqueta de cualquier modelo debe presentar una escala que proporcione unas dimensiones cómodas para ser utilizada y poder realizar las comprobaciones oportunas. Para este caso, se ha escogido una escala de 1:30. Al escalar el modelo, todas estas variables (masas, momentos de inercia, centros de gravedad, etc) van a sufrir cambios de magnitud importantes, siendo necesario adaptar el método de cálculo para que funcione correctamente y procese los datos para reflejarlos en el entorno gráfico. En la última versión generada también se incluye el océano, siendo necesario ajustar su funcionamiento para que el programa lo genere respetando las medidas del modelo y ajustando la altura del oleaje para que funcione en cualquier escala que pueda proporcionar el usuario. Para poder lograr estos requisitos, se han tenido que modificar diferentes aspectos.

En primer lugar, se ha tenido que adaptar el modelo inicial para obtener el mismo en escala 1:30. Para ello se han tomado los diferentes elementos que conforman el modelo (casco, escobén, grillete, caña y ancla) y se han reducido sus dimensiones a las correspondientes a la escala establecida. Este proceso se ha realizado mediante el uso de Rhinoceros (McNeel 2013) y Solid Edge (Siemens 2015). Este cambio de escala supone una modificación muy importante en el orden de magnitud de propiedades tales como masas, momentos de inercia, centros de gravedad, etc. Esto explica los cambios implementados en el software, pues los cálculos que realiza el programa deben funcionar correctamente a pesar de las diferencias de las unidades de entrada.

El modelo a escala obtenido tras haber realizado estas modificaciones se puede apreciar a continuación:

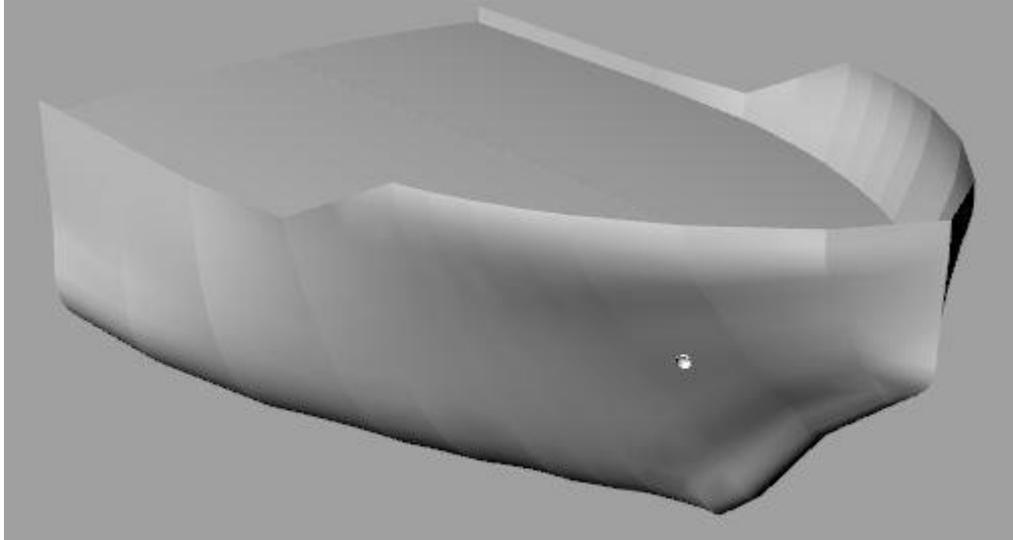


Figura 6-1. Modelo a escala 1:30

Como se puede observar, el modelo es similar al real. Sin embargo, sus medidas son mucho menores, lo que plantea una situación totalmente diferente para el software.

En segundo lugar, ha sido necesario realizar cambios importantes en el funcionamiento del software para poder adaptarlo a modelos de diferentes escalas. Hasta ahora el programa estaba siendo empleado con modelos a tamaño real, pero para llevar a cabo su validación, se han implementado numerosos cambios para adaptar los cálculos a los nuevos órdenes de magnitud de los datos que necesita el software para realizar la simulación. Hay que destacar que los materiales empleados en una maqueta son diferentes a los empleados realmente, por ello se ha incluido la densidad como parámetro a proporcionar; siendo posible establecer una densidad general, o bien una densidad independiente para algún elemento en particular. Por otra parte, puesto que los eslabones los configura el software en función del diámetro de alambre establecido, también se ha tenido que reconfigurar el método para generar la cadena y ahora es posible introducir diámetros de hasta 2,8 mm, estando anteriormente en 17 mm. De este modo se pueden utilizar modelos muy reducidos de grandes buques, como el seleccionado para este caso. Todas estas implementaciones han contribuido a la mejora

del software, generando una nueva versión más estable y adaptada para trabajar con modelos de cualquier escala. Esto va a permitir comprobar las similitudes entre un mismo modelo a distintas escalas y las similitudes entre un modelo a escala y una maqueta real, validando así el funcionamiento del software.

Hay que destacar la evolución del software tras este trabajo. Se han generado cuatro actualizaciones de la versión de SIMULANCLA, convirtiéndose en un software más estable y con más funcionalidades. También se han incorporado mejoras al entorno gráfico como la incorporación del océano.

El desarrollo del modelo a escala ha servido para establecer dos nuevas líneas de trabajo: por un lado, la simulación de dicho modelo con el software SIMULANCLA y, por otro, la fabricación de una maqueta a partir de la misma escala de la simulación. Gracias a los objetivos alcanzados, el modelo a escala desarrollado se encuentra en fase de fabricación.

Capítulo 7
Conclusiones

7. Conclusiones

En el inicio de este texto se comenta cómo hasta ahora el estudio del sistema de fondeo se realizaba mediante el uso de maquetas. Con el software SIMULANCLA es posible realizar este mismo estudio en un completo entorno informático que reduce enormemente el número de horas necesarias para conocer el funcionamiento del sistema de fondeo, además de añadir numerosas ventajas en la fase de diseño pudiendo comparar rápidamente diferentes montajes.

En el presente proyecto se ha partido de los planos de formas de un buque real. A partir de los mismos, se ha realizado todo el proceso de modelado generando la superficie del casco, la cubierta y el diseño de todos los elementos que intervienen en el sistema de fondeo. Una vez obtenidos todos los componentes del sistema de fondeo, se ha generado el conjunto realizando los ajustes necesarios para obtener el modelo a emplear en la simulación.

El siguiente paso ha sido la obtención de todos los parámetros a proporcionar al programa para poder llevar a cabo la simulación.

Posteriormente, se ha llevado a cabo la simulación del buque diseñado a tamaño real, comprobando el funcionamiento completo del sistema de fondeo. Con el uso de SIMULANCLA, se han podido obtener datos como las fuerzas ejercidas por el molinete para una determinada velocidad, la recogida de cadena por unidad de tiempo, la posición del ancla en cada instante, fuerzas de rozamiento y contacto entre los distintos elementos del sistema, zonas de contacto del ancla con el casco, entre otros. De este modo, no sólo se ha podido visualizar el movimiento que adoptará el sistema, con mayor precisión que la que era posible obtener hasta ahora con las maquetas; sino que también se han podido conocer importantes datos sobre el funcionamiento dinámico y datos referentes a la interacción de los elementos, que han permitido estudiar las condiciones que tendrán que soportar los distintos elementos.



Con las simulaciones realizadas se facilitado en gran medida la solución de posibles problemas, habiendo podido implementar cambios en el diseño con gran facilidad y con la posibilidad de comparar distintas construcciones únicamente sustituyendo los ficheros CAD de los elementos afectados. Esto mismo llevado a cabo mediante maquetas, habría supuesto unos tiempos de ejecución tan prolongados que podrían ser indeseables, o incluso imposibles de llevar a cabo.

Todos estos datos obtenidos en la simulación han permitido conocer en detalle el funcionamiento del sistema de fondeo. Con los resultados obtenidos se puede proceder a la fabricación de una maqueta conociendo de antemano el comportamiento del sistema y evitando que este proceso tenga que ser repetido con la inversión de tiempo y coste que ello supone.

Este proyecto constituye un primer paso para la validación del software, comparando datos de simulación con datos reales. Para ello, ante la imposibilidad de construir un buque a escala real, se ha podido desarrollar el modelo de este buque a escala 1:30, estando ya en proceso su fabricación. Esto servirá de base para comprobar cómo se comporta el software en estas nuevas condiciones y las similitudes con la simulación realizada.

Es importante destacar que todo esto no es lo único que puede ofrecer SIMULANCLA. Este software puede incorporar más funcionalidades que puedan ser de utilidad a la hora de diseñar este tipo de sistemas. Se abre la posibilidad de implementar fenómenos meteorológicos o los efectos del mar que puedan interferir en la maniobra. Todas estas posibilidades abren un importante camino para la creación de un software muy innovador con un potencial muy amplio.

En definitiva, se puede verificar la gran utilidad de este software para el diseño de sistemas de fondeo que hasta ahora presentaba tantas dificultades materiales. Su uso supone un importante ahorro de tiempo, coste y medios humanos implicados en el desarrollo de estos sistemas.



Capítulo 8
Bibliografía

8. Bibliografía

Álvarez, A 2015, 'Hull Modelling Methodology', Ferrol.

Autodesk, I 2015, *AutoCAD*.

Bayo, E, García de Jalón, J & J. & Serna, M 1988, 'A Modified Lagrangian Formulation for the Dynamic Analysis of Constrained Mechanical Systems', vol 71, pp. 181-183.

Comas Turnes, E, 'EQUIPOS Y SERVICIOS, Volumen II. Fondeo, Amarre y Remolque'.

Cuadrado, J, Cardenal, J, Morer, P & Bayo, E 2000, 'Intelligent simulation of multibody dynamics: Space-state and descriptor methods in sequential and parallel computing environments', vol 4, no. 1, pp. 55-73.

Design of the Navy 1984, 'Calculation and Use of Anchoring Monographs', Naval Sea Systems Command.

Dopico, D 2015, *Simulancla*.

Dopico, D 2015, 'Software para el análisis computacional del diseño de sistemas de fondeo en buques de gran tamaño', Ferrol.

Dopico, D, González, F, Cuadrado, J & J. & Kovacs, J 2014, 'Determination of Holonomic and Nonholonomic Constraint Reactions in an Index-3 Augmented Lagrangian Formulation With Velocity and Acceleration Projections', vol 9, no. 4, pp. 041006-041006.

Dopico, D, Luaces, A, Gonzalez, M & Cuadrado, J 2011, 'Dealing with multiple contacts in a human-in-the-loop application.', vol 25, no. 2, pp. 167-183.

Flores, P, Machado, M, Silva, M & Martins, J 2011, 'On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics', vol 25, pp. 357-375.



Gonthier, Y, McPhee, J, Lange, C & Piedboeuf, J-C 2004, 'A regularized contact model with asymmetric damping and dwell-time dependent friction', vol 11, no. 3, pp. 209–233.

Hunt, K & Crossley, F 1975, 'Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact', vol 42, no. 2, pp. 440–445.

International Association of Classification 2014, 'Mooring, Anchoring and Towing'.

'International Standard ISO 1704' 1973.

Laboratorio de Ingeniería Mecánica, *Laboratorio de Ingeniería Mecánica.*, viewed Julio 2010, <lim.ii.udc.es/>.

McNeel, R 2013, *Rhinoceros 3D*.

'Navegar' 2007, no. Publicación 196.

Schenk, B 2012, *Fondear*, Ediciones Tutor, Madrid.

Siemens 2015, *Solid Edge*, <<http://www.solidedge.es/>>.

Villa Caro, R, Fraguera Formoso, JA & Carral Couce, LM, 'Selección del equipo de amarre y fondeo de un remolcador'.

Capítulo 9

Anejos



9. ANEJOS

9.1. Anejo I: Plano de formas del buque