

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“DISEÑO NUMERICO-EXPERIMENTAL DE UN
BULBO DE PROA PARA UNA EMBARCACIÓN
PESQUERA TIPO CERCO”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO NAVAL**

EDUARDO MARTIN JIMENEZ LIMAY

PROMOCIÓN 2007-I

LIMA-PERÚ

2010

AGRADECIMIENTOS

A mi tía Ana María, por el interés mostrado ya que creo que no hubiera día alguno en el que no me preguntara como iba con el proyecto, por sus palabras de aliento y apoyo durante todos estos años .

A mi tía Margarita, a mi Papa, mi hermana Alexandra, mis primos Cesar, Silvia y Wilson y a mi Abuelita por todo el apoyo brindado y por aguantar todos estos años mis bromas y demás cosas.

A mis amigos Mg. Cesar Salhua Moreno y al Ing. José Carlos Villagomez Rosales ya que sus ideas, comentarios y tiempo dedicado a este proyecto han sido fundamentales para la finalización de este.

Al profesor Ing. Acosta Víctor Pastor y al equipo humano del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Laboratorio Nacional de Hidráulica por el apoyo, confianza y amistad.

A todas las personas y amigos que de alguna manera contribuyeron a que con este proyecto llegue a la meta de una carrera larga y complicada.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PROLOGO.....	1
INTRODUCCION.....	5
1.1 OBJETIVO	5
1.2 METODO DE TRABAJO	6
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	7
FUNDAMENTOS TEORICOS	8
2.1 RESISTENCIA AL AVANCE	8
2.1.1 GENERALIDADES	8
2.1.2 DESCOMPOSICION DE LA RESISTENCIA.....	9
2.1.3 DIVISIÓN DE FROUDE.....	10
2.1.3.1 RESISTENCIA FRICCIONAL (R_F).....	11
2.1.3.2 RESISTENCIA RESIDUAL (R_R).....	11
2.1.4 DIVISIÓN DE HUGHES	11
2.1.4.1 RESISTENCIA VISCOSA (R_V).....	12
2.1.4.2 RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS (R_W).....	12
2.1.5 METODOS DE CORRELACION.....	12
2.1.5.1 MÉTODO DE FROUDE.....	13
2.1.5.2 MÉTODO DE HUGHES-PROHASKA.....	14
2.1.6 FORMACION DE OLAS	15

2.1.6.1	SISTEMA DE OLAS PRIMARIAS	16
2.1.6.2	SISTEMA DE OLAS SECUNDARIAS	18
2.1.6.3	INTERFERENCIA DEL SISTEMA DE OLAS.....	20
2.2	BULBO DE PROA.....	23
2.2.1	GENERALIDADES	23
2.2.2	CLASIFICACION DE BULBOS	30
2.2.2.1	SEGÚN LA FORMA DE LAS SECCIONES.....	30
2.2.2.2	SEGÚN SU INTERSECCIÓN CON LA CARENA.....	31
2.2.2.3	SEGÚN EL TIPO DE PERFIL LONGITUDINAL	32
2.2.3	PARAMETROS GEOMETRICOS	33
2.2.4	METODOS DE DISEÑO	35
2.2.4.1	MÉTODO DE TAYLOR	35
2.2.4.2	MÉTODO DE KRACHT.....	39
2.2.4.3	MÉTODO DE GARCÍA.....	44
2.2.4.4	MÉTODO DE CARLIER.....	50
2.2.5	APLICACIÓN DE BULBOS	55
2.2.5.1	APLICACIÓN EN GRANDES TANQUEROS Y BUQUES DE CARGA.....	55
2.2.5.2	APLICACIÓN EN BARCOS PESQUEROS.....	55
2.2.5.3	APLICACIÓN EN BUQUES DE ALTA VELOCIDAD.....	57
2.3	CFD-DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	59
2.3.1	REVISION HISTORIA	60
2.3.2	CFD-SHIPWAVE.....	63
2.3.2.1	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA HIDRODINÁMICO DE LA RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS	65
2.3.2.2	APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS PANELES.....	69
2.3.3	CFD- TDYN	74

2.3.3.1	<i>ECUACIONES DE NAVIER-STOKES</i>	75
2.3.3.2	<i>ESTABILIDAD DE ALGORITMOS CFD</i>	76
2.3.3.3	<i>TEORIA BASICA</i>	77
2.3.4	VALIDACION DE CFD.....	92
2.3.4.1	<i>CFD-SHIPWAVE</i>	93
2.3.4.2	<i>CFD-TDYN</i>	95
	METODOLOGIA DEL DISEÑO DEL BULBO	98
3.1	DISEÑO DEL BULBO BASE	99
3.1.1	FORMAS DEL CASCO	99
3.1.2	DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO	104
3.1.2.1	<i>KRACTH</i>	104
3.1.2.2	<i>CARLIER</i>	110
3.1.2.3	<i>GARCIA</i>	111
3.1.3	VALORES DE DISEÑO	111
3.1.4	GEOMETRIA DEL BULBO	112
	OPTIMIZACION NUMERICA DEL BULBO	118
4.1	VARIACIONES DE LA FORMA DEL BULBO BASE.....	118
4.2	DETERMINACION DEL BULBO ÓPTIMO	128
4.2.1	SIMULACIONES NUMERICAS	128
4.2.1.1	<i>CFD-SHIPWAVE</i>	128
4.2.1.2	<i>CFD-TDYN</i>	130
4.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	131
4.2.2.1	<i>CFD-SHIPWAVE</i>	131
4.2.2.1.1	<i>RESULTADOS DE RESISTENCIA EN AGUAS CALMAS</i>	133
4.2.2.1.2	<i>CONCLUSIÓN</i>	139
4.2.2.2	<i>CFD-TDYN</i>	141

4.2.1.2.1 RESULTADOS DE RESISTENCIA EN AGUAS CALMAS.....	143
4.2.1.2.2 CONCLUSIÓN.....	144
4.2.3 COMPARACION DE RESULTADOS.....	155
4.2.3.1 BULBO SELECCIONADO.....	159
ENSAYO EXPERIMENTAL.....	160
5.1 DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES.....	160
5.2 DEFINICION DEL ENSAYO.....	165
5.3 ENSAYOS DE REMOLQUE EN AGUAS TRANQUILAS	168
5.3.1 MODELO SIN BULBO.....	168
5.3.1.1 EXTRAPOLACIÓN MODELO- BUQUE SIN BULBO	170
5.3.2 MODELO CON BULBO.....	172
5.3.2.1 EXTRAPOLACIÓN MODELO- BUQUE CON BULBO.....	173
5.4 COMPARACION DE RESULTADOS.....	176
CONCLUSIONES.....	180
APENDICE A- FOTOGRAFIAS.....	187
APENDICE B- PROCEDIMIENTO CFD- SHIPWAVE	195
APENDICE C-PROCEDIMIENTO CFD- TDYN.....	206

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: DESCOMPOSICIÓN DE LA RESISTENCIA-VOLKER BERTRAM (2000)	9
FIGURA 2-2: FLUJO ALREDEDOR DE UN CUERPO SUMERGIDO-ZAZURCA (1972)	16
FIGURA 2-3: SISTEMA DE OLAS PRIMARIAS-VOLKER BERTRAM (2000)	17
FIGURA 2-4: PATRÓN DE OLAS DE KELVIN-LEWIS (1988)	18
FIGURA 2-5: SISTEMA DE OLAS GENERADO POR EL BUQUE.....	19
FIGURA 2-6: VELOCIDAD Y LONGITUD DE OLAS DIVERGENTES-LEWIS (1988).....	20
FIGURA 2-7: INTERFERENCIA NEGATIVA	21
FIGURA 2-8: BULBO DE PROA.....	23
FIGURA 2-9: TIPOS DE BULBOS-KRACTH (1978).....	30
FIGURA 2-10: BULBO INTEGRADO-CARLIER (1985).....	31
FIGURA 2-11: BULBO POSTIZO-CARLIER (1985)	32
FIGURA 2-12: BULBOS ALTO, BAJO Y NORMAL-CARLIER (1985)	32
FIGURA 2-13: CANTIDADES LINEALES Y NO LINEALES DEL BULBO-KRACHT (1978)	33
FIGURA 2-14: DEFINICIÓN DEL BULBO EN TÉRMINOS DE F Y T.....	36
FIGURA 2-15: RELACIÓN DE LA $Rr\Delta$ CON LOS PARÁMETROS F Y T-TAYLOR (1933) ..	37
FIGURA 2-16: RELACIÓN DE LA $Rr\Delta$ CON LOS PARÁMETROS F Y T-TAYLOR (1933).....	38

FIGURA 2-17: COEFICIENTE BLOQUE VS COEFICIENTE VOLUMÉTRICO Y ALTURA- KRACHT (1978)	40
FIGURA 2-18: COEFICIENTE LATERAL Y TRANSVERSAL VS COEFICIENTE VOLUMÉTRICO- KRACHT (1978)	40
FIGURA 2-19: COEFICIENTE DE MANGA Y LONGITUD VS COEFICIENTE VOLUMÉTRICO-KRACHT (1978)	41
FIGURA 2-20: INCREMENTO DEL VOLUMEN (C_{VBT}) Y DE LA SUPERFICIE MOJADA (C_{SBT}) DEL CASCO BASE DEBIDO AL BULBO DE PROA VS COEFICIENTE	41
FIGURA 2-21: GRAFICO CARACTERÍSTICO DE REDUCCIÓN DE POTENCIA RESIDUAL- KRACHT (1978)	42
FIGURA 2-22: OPTIMO NUMERO DE FROUDE-GARCÍA (1991).....	46
FIGURA 2-23: PROTUBERANCIA ÓPTIMA-GARCÍA (1991)	47
FIGURA 2-24: ÁREA DE LA CUADERNA 20 EN FUNCIÓN DEL CB-GARCÍA (1991).....	48
FIGURA 2-25: ALTURA DEL BULBO EN FUNCIÓN DE $C_B X B / L_{pp}$ -GARCÍA (1991).....	49
FIGURA 2-26: VALORES EMPIRICOS DE S_B EN FUNCIÓN DE C_B Y L/B -CARLIER (1985). .54	
FIGURA 2-27: SISTEMA DE REFERENCIA FIJO EN EL NAVÍO, CXYZ.....	65
FIGURA 2-28 – PANEL CUADRILATERAL	70
FIGURA 2-29 – BALANCE DE MASA EN DOS DIMENSIONES.....	78
FIGURA 2-30: DISCRETIZACIÓN DEL NAVÍO WIGLEY	93
FIGURA 2-31: CURVA DE CW VS NUMERO DE FROUDE	94
FIGURA 2-32: ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL NAVÍO WIGLEY – FN=0.30.....	94
FIGURA 2-33: DISCRETIZACIÓN DEL NAVÍO WIGLEY Y VOLUMEN DE CONTROL.....	96

FIGURA 2-34: PERFIL DE OLAS	96
FIGURA 2-35: COMPARACIÓN DEL PERFIL DE OLAS OBTENIDO MEDIANTE TDYN CON EL PERFIL DE OLAS OBTENIDO MEDIANTE UN ENSAYO EXPERIMENTAL.....	97
FIGURA 3-1: VISTAS EN 3D DEL PLANO DE FORMAS.....	100
FIGURA 3-2: CUADERNAS HASTA LA LÍNEA DE FLOTACIÓN	100
FIGURA 3-3: SUPERFICIE DEL CASCO A ESTUDIAR	101
FIGURA 3-4: ΔC_{PVR} VS C_{BB}	106
FIGURA 3-5: ΔC_{PVR} VS C_{ABL}	106
FIGURA 3-6: ΔC_{PVR} VS C_{LPR}	107
FIGURA 3-7: ΔC_{PVR} VS C_{ABT}	107
FIGURA 3-9: ΔC_{PVR} VS C_{VPR}	108
FIGURA 3-10: FORMAS ORIGINALES DEL CASCO "HULL"	116
FIGURA 3-11: FORMA CON BULBO 3.1 (BULBO BASE)	117
FIGURA 4-1: DIMENSIONES DEL BULBO	119
FIGURA 4-2: FORMA CON BULBO 3.2.....	122
FIGURA 4-3: FORMA CON BULBO 3.3.....	123
FIGURA 4-4: FORMA CON BULBO 3.4.....	124
FIGURA 4-5: FORMA CON BULBO 3.5.....	125
FIGURA 4-6: FORMA CON BULBO 3.6.....	126
FIGURA 4-7: FORMA CON BULBO 3.7.....	127
FIGURA 4-8: COEFICIENTE POR FORMACIÓN VS NUMERO DE FROUDE.....	128
FIGURA 4-9: COEFICIENTE POR FORMACIÓN DE OLAS VS NUMERO DE FROUDE.....	131

FIGURA 4-10: COEFICIENTE DE RESISTENCIA TOTAL VS VELOCIDAD.....137

FIGURA 4-11: POTENCIA EFECTIVA VS VELOCIDAD.....137

FIGURA 4-12: RELACIÓN DE POTENCIA VS VELOCIDAD.....138

FIGURA 4-13: ELEVACIÓN DE OLAS- CASCO “HULL”144

FIGURA 4-14: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES CASCO “HULL”145

FIGURA 4-15: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES CASCO “HULL”146

FIGURA 4-16: LÍNEAS DE CORRIENTE CASCO “HULL”147

FIGURA 4-17: CORTE DE OLAS A 0.5665 B “HULL”148

FIGURA 4-18: ELEVACIÓN DE OLAS CASCO-BULBO 3.3149

FIGURA 4-19: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES CASCO-BULBO 3.3150

FIGURA 4-20: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES CASCO-BULBO 3.3151

FIGURA 4-21: LÍNEAS DE CORRIENTE CASCO-BULBO 3.3.....152

FIGURA 4-22: CORTE DE OLAS A 0.5665 B CASCO-BULBO 3.3.....153

FIGURA 4-23: COEFICIENTE POR FORMACIÓN DE OLAS VS NUMERO DE FROUDE156

FIGURA 4-24: POTENCIA EFECTIVA VS NUMERO DE FROUDE.....156

FIGURA 4-25: % REDUCCIÓN COEFICIENTE POR FORMACIÓN DE OLAS VS NÚMERO DE BULBO157

FIGURA 4-26: % REDUCCIÓN POTENCIA EFECTIVA VS NUMERO DE FROUDE157

FIGURA 5-1: CANAL DE EXPERIENCIAS HIDRODINÁMICAS-UNI.....160

FIGURA 5-2: DIMENSIONES DEL CANAL161

FIGURA 5-3: ESTRUCTURA DE SUJECIÓN EN PUENTE MÓVIL162

FIGURA 5-4: CARRO DINAMOMÉTRICO163

FIGURA 5-5: CELDA DE CARGA.....	163
FIGURA 5-6: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	164
FIGURA 5-7: MODELO DEL CASCO EN EL TANQUE DE PRUEBAS.....	168
FIGURA 5-8: MODELO DEL CASCO SIN BULBO DE PROA	169
FIGURA 5-9: CURVA RESISTENCIA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”	171
FIGURA 5-10: CURVA POTENCIA EFECTIVA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”	171
FIGURA 5-11: MODELO DEL CASCO CON BULBO OPTIMO	172
FIGURA 5-12: MODELO DEL CASCO EN EL TANQUE DE PRUEBAS.....	172
FIGURA 5-13: CURVA RESISTENCIA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”-CON BULBO	174
FIGURA 5-14: CURVA RESISTENCIA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”-CON BULBO	175
FIGURA 5-15: CURVA RESISTENCIA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”-CON BULBO Y SIN BULBO	176
FIGURA 5-16: POTENCIA EFECTIVA VS VELOCIDAD DEL CASCO “HULL”-CON BULBO Y SIN BULBO	177
FIGURA 5-17: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO – 10.83 NUDOS.....	178
FIGURA 5-18: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO- 10.96 NUDOS	178
FIGURA 6-1: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO - 0 NUDOS	189
FIGURA 6-2: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO- 10.83 NUDOS	189
FIGURA 6-4: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO – 12.06 NUDOS.....	190
FIGURA 6-5: SALIDA DE PUERTO SIN BULBO – 13.13 NUDOS.....	190
FIGURA 6-6: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 0 NUDOS.....	191
FIGURA 6-7: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 9.02 NUDOS.....	191

FIGURA 6-8: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 10.96 NUDOS	192
FIGURA 6-9: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 11.74 NUDOS	192
FIGURA 6-10: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 12.64 NUDOS	193
FIGURA 6-11: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 11.74 NUDOS	193
FIGURA 6-12: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 11.74 NUDOS	194
FIGURA 6-13: SALIDA DE PUERTO CON BULBO – 11.74 NUDOS	194
FIGURA 7-1: FORMAS DEL CASCO	195
FIGURA 7-2: TIPOS DE PUNTOS	197
FIGURA 7-3: PUNTOS DE PROA DE CASCO	198
FIGURA 7-4: CUERPO DE CASCO	199
FIGURA 7-5: PROA DE BULBO	200
FIGURA 7-6: POPA DE BULBO	201
FIGURA 7-7: PUNTOS DEL CUERPO DE BULBO.....	202
FIGURA 7-8: CASCO DISCRETIZADO	203
FIGURA 7-9: SECCIONES DEL CASCO “HULL” A SER DISCRETIZADO.	204
FIGURA 7-10: CASCO ORIGINAL DISCRETIZADO	204
FIGURA 7-11: CURVA DEL CW VS FN DEL CASCO ORIGINAL	205
FIGURA 8-1: GEOMETRÍA EN TDYN	207
FIGURA 8-2: VOLUMEN DE CONTROL	207
FIGURA 8-3: CAMPO DE PRESIONES	208
FIGURA 8-4: CAMPO DE VELOCIDADES.....	209
FIGURA 8-5: CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODULO RANSOL.....	209

FIGURA 8-6: SELECCIÓN DEL MATERIAL	210
FIGURA 8-7: LIMITE DEL CUERPO FLUIDO	211
FIGURA 8-8: LIMITE DE LA SUPERFICIE LIBRE	211
FIGURA 8-9: DATOS INICIALES.....	212
FIGURA 8-10: PROBLEMA Y ANÁLISIS	213
FIGURA 8-11: PROBLEMA Y ANÁLISIS	214
FIGURA 8-12: OTHER PAGE	214
FIGURA 8-13: OTHER PAGE	215
FIGURA 8-14: GENERACIÓN DE MALLA.....	216
FIGURA 8-15: MALLA DE LA SUPERFICIE Y DEL CASCO	216
FIGURA 8-16: ALTURA DE OLAS SOBRE LA SUPERFICIE-“HULL”	217
FIGURA 8-17: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE LA CARENA-“HULL”	218
FIGURA 8-18: CORTE DE OLAS A 0.5665 B “HULL”	218
FIGURA 8-19: LÍNEAS DE CORRIENTE CARENA “HULL”	219

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1: DIMENSIONES DEL NAVÍO WIGLEY-SHIPWAVE.....	93
TABLA 2-2: DIMENSIONES DEL NAVÍO WIGLEY-TDYN	95
TABLA 3-1: DIMENSIONES PRINCIPALES DEL BUQUE.....	103
TABLA 3-2: REDUCCIÓN DE POTENCIA RESIDUAL.....	104
TABLA 3-3: PARÁMETROS DE DISEÑO	105
TABLA 3-4: PARÁMETROS CARLIER.....	110
TABLA 3-5: PARÁMETROS GARCÍA.....	111
TABLA 3-6: VALORES DE DISEÑO.....	111
TABLA 4-1: PORCENTAJE DE VARIACIÓN-FIJANDO L.....	120
TABLA 4-2: PORCENTAJE DE VARIACIÓN-FIJANDO B.....	120
TABLA 4-3: PORCENTAJE DE VARIACIÓN-FIJANDO H	120
TABLA 4-4: PARÁMETROS DE BULBOS	121
TABLA 4-5: COEFICIENTE DE FORMACIÓN DE OLAS	129
TABLA 4-6: COEFICIENTE DE FORMACIÓN DE OLAS, VISCOSO Y TOTAL	130
TABLA 4-7: FIJANDO LA PROTUBERANCIA	132
TABLA 4-8: FIJANDO LA MANGA.....	132
TABLA 4-9: FIJANDO LA ALTURA.....	132

TABLA 4-10: RESISTENCIA TOTAL EN AGUAS CALMAS	136
TABLA 4-11: VALORES DE LOS PARÁMETROS DE BULBO	139
TABLA 4-12: COEFICIENTE DE FORMACIÓN DE OLAS, VISCOSA Y TOTAL	141
TABLA 4-13: FIJANDO LA PROTUBERANCIA	142
TABLA 4-14: FIJANDO LA MANGA	142
TABLA 4-15: FIJANDO LA ALTURA	142
TABLA 4-16: RESISTENCIA TOTAL EN AGUAS CALMAS	143
TABLA 4-17: COMPARACIÓN DE COEFICIENTE DE OLAS Y RESISTENCIA AL AVANCE	155
TABLA 4-18: COMPARACIÓN DE % DE REDUCCIÓN –COEFICIENTE DE OLAS Y POTENCIA EFECTIVA	155
TABLA 4-19: RANKING DE BULBOS	158
TABLA 5-1: DATOS DEL MODELO.....	168
TABLA 5-2: RESULTADO DEL ENSAYO DE MODELO.....	169
TABLA 5-3: DIMENSIONES BUQUE	170
TABLA 5-4: COEFICIENTE DE RESISTENCIA RESIDUAL DEL BUQUE	170
TABLA 5-5: RESISTENCIA TOTAL DEL BUQUE	170
TABLA 5-6: DATOS DEL MODELO.....	172
TABLA 5-7: RESULTADO DEL ENSAYO DE MODELO.....	173
TABLA 5-8: DIMENSIONES BUQUE	173
TABLA 5-9: COEFICIENTE DE RESISTENCIA RESIDUAL BUQUE	173
TABLA 5-10: RESISTENCIA TOTAL DEL BUQUE	174
TABLA 7-1: CARTILLA DE PUNTOS DE PROA	196

TABLA 7-2: CARTILLA DE PUNTOS POPA	196
TABLA 7-3: PUNTOS EN PROA.....	199
TABLA 7-4: CUERPO DE CASCO	200
TABLA 7-5: PUNTOS PROA DE BULBO	201
TABLA 7-6: PUNTOS POPA DE BULBO	201
TABLA 7-7: PUNTOS POPA DE BULBO	202

PROLOGO

La resistencia al avance en la velocidad de servicio determina la potencia de la planta propulsora, y por lo tanto el consumo de combustible, uno de los factores de influencia determinante en la economía en servicio del buque. La minimización de la resistencia al avance y en consecuencia de la potencia propulsora, así como el asegurar que la planta propulsora sea capaz de entregar una potencia suficiente para cumplir los citados requisitos son, por lo tanto, una de las funciones más importantes de la oficina de proyectos y aspectos de importancia crucial en el diseño del buque.

Uno de los problemas más importantes en la hidrodinámica de barcos concierne a la resistencia por formación de olas. Esta componente de la resistencia al avance total es predominante en barcos de desplazamiento y su magnitud es muy sensible a pequeñas variaciones geométricas del casco sumergido, el proceso de optimización de las formas de cascos de desplazamiento, desde el punto de vista de la disminución de la resistencia al avance total, tiene por objetivo la reducción de esta componente. Particularmente esta resistencia está fuertemente influenciada por el patrón de flujo de agua alrededor de la proa del barco. La búsqueda para reducir esta resistencia ha tomado muchas direcciones. Una de las soluciones más significativas ha sido el desarrollo de los bulbos de proa.

Tradicionalmente, el Ingeniero Naval ha mirado los ensayos hidrodinámicos con modelos como el mejor medio para conocer la resistencia al avance, siendo este el único ensayo que existe para determinar la resistencia con exactitud. Desafortunadamente estos ensayos son costosos y lentos, por lo que su uso es limitado y restringido, cuando se requiere ensayar varias formas de cascos con fines de optimización.

Por otra parte, aunque el planteamiento matemático de la determinación de la resistencia por formación de olas ya se conocía desde el siglo pasado, este no pudo resolverse de forma satisfactoria hasta el incremento en la capacidad de procesamiento de los ordenadores y el desarrollo de los CFD (Computational Fluid Dynamics) a inicios de los años 70.

Los CFD representan bien la física del problema de la resistencia al avance, cuantitativamente han alcanzado buena precisión, en algunos casos. Pero aun no se tiene la confianza suficiente para utilizarlos sin la posterior comprobación experimental. Por este motivo, actualmente los métodos CFD se utilizan como herramienta de apoyo a los ensayos experimentales, es decir, varias formas son simuladas numéricamente y solamente la forma que obtiene mejor desempeño en el CFD es ensayada experimentalmente, con lo cual se reduce el costo y tiempo utilizado en problemas de optimización.

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo reducir la resistencia al avance de una embarcación pesquera mediante el diseño de un bulbo de proa utilizando códigos

CFD como auxilio a la experimentación. Para lograr tal objetivo se diseñan una serie de bulbos de proa, los cuales son analizados mediante dos códigos numéricos seleccionándose de este análisis el bulbo óptimo a ser ensayado experimentalmente.

En el primer capítulo se describe el objetivo, método de trabajo y los alcances y limitaciones del presente trabajo de tesis.

Seguidamente, en el capítulo 2, presentamos los fundamentos teóricos en los que se basa este trabajo. Capítulo en el que se presenta la descripción de la resistencia al avance, su división histórica, los métodos de correlación y el fenómeno de la formación de olas. Se describe también los bulbos de proa, sus formas más utilizadas, los parámetros que definen su geometría, los métodos de diseño y la aplicación de los bulbos de proa en algunas embarcaciones. Finalmente cerramos este capítulo con una breve descripción de los códigos numéricos utilizados, para la evaluación en términos de resistencia hidrodinámica de los bulbos diseñados, códigos que vienen siendo usados con singular éxito por ingenieros navales alrededor del mundo.

En el capítulo 3, nos centramos en el diseño del bulbo propiamente dicho, se muestra la metodología adoptada y la geometría del primer bulbo generado.

En el capítulo 4, presentamos el proceso de optimización de las formas del primer bulbo generado, también se muestran los resultados y análisis de la aplicación

práctica de los códigos numéricos, descritos en el capítulo 2, a los bulbos generados para la determinación del bulbo óptimo.

En el capítulo 5, presentamos la descripción de las instalaciones del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería y los ensayos de remolque realizados. Se muestran los resultados obtenidos, tanto para la embarcación sin bulbo como para la embarcación con el bulbo óptimo.

Finalmente, en el capítulo 6, se dan las conclusiones resultantes del presente trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

En este capítulo introductorio se presentan las líneas básicas del trabajo que se ha llevado a cabo en esta tesis.

1.1 OBJETIVO

La meta general que se pretende con este trabajo de tesis es diseñar un bulbo de proa para una embarcación pesquera tipo cerco, para la velocidad de proyecto de 12 nudos en condición de salida de puerto, con la finalidad de reducir su resistencia al avance.

Mostrar la aplicación de los métodos numéricos en la determinación de las características hidrodinámicas de una embarcación pesquera.

1.2 METODO DE TRABAJO

Este presente trabajo de tesis se desarrolla utilizando el casco de una embarcación de desplazamiento, embarcación pesquera denominada “HULL”, a la cual se le diseña una serie de bulbos de proa con la finalidad de reducir su resistencia al avance. Todos estos bulbos son diseñados a través de la variación sistemática de los parámetros de formas de un bulbo base, del tipo gota invertida. La elección de este tipo de bulbo, como bulbo base, radica en que este viene siendo usado con singular éxito en embarcaciones de desplazamiento.

Como resultado del diseño de estos bulbos, múltiples variaciones de las formas del casco original son obtenidas. Estas variaciones del casco son analizadas hidrodinámicamente, en términos de resistencia al avance, mediante dos códigos numéricos uno basado en el método de los paneles y el otro en la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds. De estos análisis numéricos se selecciona el bulbo óptimo a instalar en la embarcación el cual posteriormente es sometido a ensayos de remolque, con la finalidad de determinar su desempeño real, en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI).

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

La embarcación elegida para el presente estudio, es una embarcación de tipo cerco, esto debido a que esta es una embarcación representativa de la flota pesquera actual del país.

El efecto del bulbo de proa puede extenderse a varias áreas del buque; diseño, construcción, manufactura y operación. El bulbo influye en las características de comportamiento en el mar, características de propulsión, en la maniobrabilidad, resistencia al avance, construcción y manufactura. El presente estudio se limitara solo a analizar el efecto del bulbo de proa en la resistencia al avance.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 RESISTENCIA AL AVANCE

La resistencia al avance de un buque a una velocidad determinada es la fuerza necesaria para remolcarlo a esa velocidad en aguas tranquilas, suponiendo que no hay interferencia del buque remolcador.

2.1.1 GENERALIDADES

Uno de los problemas de mayor importancia que debe de afrontar el ingeniero naval es asegurar que dentro de los límites de requerimientos de diseño, la forma del casco y la propulsión sean lo más eficientes en el sentido hidrodinámico. Es decir que la embarcación diseñada se mueva con la menor resistencia posible al avance.

El ingeniero naval ha mirado los ensayos hidrodinámicos, con modelos a escala, como el mejor medio para conocer la resistencia al avance. Han sido numerosos los métodos propuestos para extrapolar los resultados experimentales, con modelos a escala, al buque real.

En este trabajo solo se mencionan los métodos de Froude y Hughes que son los más utilizados en los canales de experiencia hidrodinámica.

2.1.2 DESCOMPOSICION DE LA RESISTENCIA

Debido a que la resistencia de un buque a escala real no puede ser medida directamente a través de pruebas de modelos. La medida de la resistencia en aguas calmas es usualmente descompuesta en varias componentes, estas usualmente interactúan unas con otras y muchas de ellas no pueden ser medidas de forma individual. El concepto de descomposición de la resistencia ayuda en el diseño de las formas del casco. Larsson y Baba (1996) dan una sencilla descripción de la descomposición de la resistencia al avance.

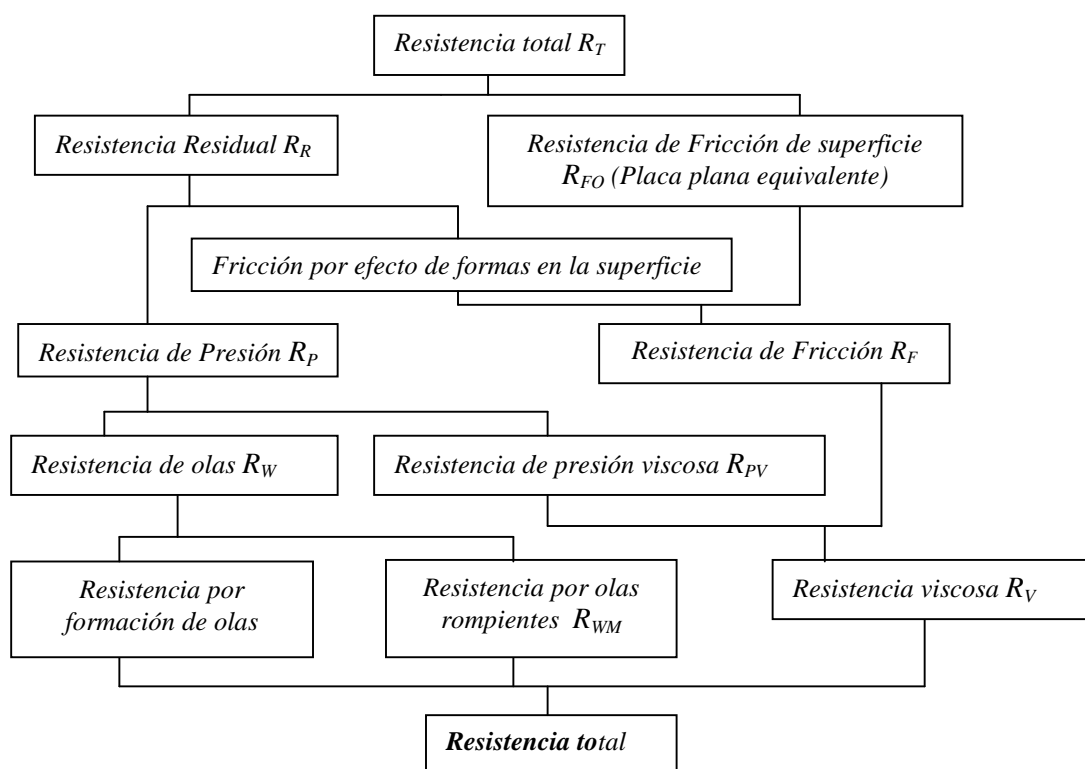


Figura 2-1: Descomposición de la resistencia-Volker Bertram (2000)

2.1.3 DIVISIÓN DE FROUDE

William Froude (1810-1879), fue uno de los primeros en realizar estudios experimentales sobre Resistencia al Avance. Froude quien conocía las leyes que gobiernan la resistencia residual, concluyó que el problema de extrapolación de modelo a buque podía solo ser resuelto dividiendo la resistencia en dos componentes la **resistencia friccional** y la **resistencia residual**. Su hipótesis puede ser resumida como: "Si dos cuerpos de formas geoméricamente similares (dos buques o un barco y su modelo) son corridos a velocidades proporcionales a la raíz cuadrada de sus dimensión lineal (velocidades correspondientes) entonces sus resistencias residuales esta en relación del cubo de su dimensión lineal".

$$R_T = R_F + R_R \quad 2.1$$

Numero de Froude:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad 2.2$$

Velocidades correspondientes:

$$\frac{v_m}{\sqrt{L_m}} = \frac{v_b}{\sqrt{L_b}} \quad 2.3$$

Relación de resistencias

$$\frac{R_{RB}}{R_{RM}} = \frac{\Delta_B}{\Delta_M} = \frac{L_B^3}{L_M^3} \quad 2.4$$

2.1.3.1 RESISTENCIA FRICCIONAL (R_F)

Froude, asimila la resistencia de fricción del buque al de una placa plana equivalente de la misma longitud y superficie mojada que el buque. Esta resistencia es debida a las fuerzas de carácter viscoso, producidas por el rozamiento entre el fluido y la carena.

2.1.3.2 RESISTENCIA RESIDUAL (R_R)

Es definida como la diferencia entre la resistencia total al avance y la resistencia friccional. La resistencia residual es debida principalmente a la formación de olas.

2.1.4 DIVISIÓN DE HUGHES

Hughes en su hipótesis plantea que la resistencia al avance está conformada por la resistencia viscosa y la resistencia por formación de olas.

$$R_T = R_V + R_W = R_F(1 + k) + R_W \quad 2.5$$

Tras observar los resultados de numerosos ensayos con modelos a distintos números de Reynolds y escasa formación de olas propuso la hipótesis, de que el cociente entre el coeficiente de resistencia viscosa de una carena y el de fricción de una placa plana equivalente es independiente del número de Reynolds para unas formas dadas. A este cociente lo llamó factor de forma (1+K)

$$1 + K = \frac{C_V}{C_F} \quad 2.6$$

2.1.4.1 RESISTENCIA VISCOSA (R_v)

Es la suma de la resistencia de fricción de una placa plana más la influencia de la forma del buque sobre ella y la resistencia de presión viscosa, debida a la modificación del flujo potencial por el espesor de la capa límite y su separación, ver figura 2-2, si existe.

Hughes obtuvo una expresión del coeficiente de fricción de placas planas.

$$C_F = \frac{0.066}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad 2.7$$

$$R_F = C_F X^{\frac{1}{2}} \rho X V^2 X S \quad 2.8$$

2.1.4.2 RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS (R_w)

Equivale a la energía disipada al formar el tren geométrico de olas que acompaña al buque.

2.1.5 METODOS DE CORRELACION

Se entiende por métodos de correlación al conjunto de hipótesis y cálculos que permiten obtener la resistencia a la marcha de un buque a partir del ensayo o ensayos realizados con uno o varios modelos geoméricamente semejantes. La correlación modelo buque es el problema fundamental en un Canal de Experiencias y su resolución está íntimamente ligado con el de la extrapolación de la resistencia.

2.1.5.1 MÉTODO DE FROUDE

Froude, propone el siguiente método, el cual está basado en ($C_T = C_R + C_F$)

- El modelo se construye a una escala λ y se corre a la velocidad correspondiente.
- Se calcula la resistencia de fricción del modelo R_{FM} , asumiendo que la resistencia es la misma que la de una placa plana lisa equivalente de la misma longitud y superficie mojada que el modelo.
- La resistencia residual del modelo es:

$$R_{RM} = R_{TM} - R_{FM} \quad 2.9$$

- La resistencia residual del buque se calcula mediante la ley de comparación

$$R_{RB} = R_{RM} \times \lambda^2 \quad 2.10$$

- Se calcula la R_{FB} aplicando las mismas suposiciones que las que se han hecho para el modelo, usando un coeficiente de fricción apropiado a la longitud del buque.
- Finalmente la resistencia total del buque es:

$$R_{TB} = R_{FB} + R_{RB} \quad 2.11$$

Este método de extrapolación de modelo a buque es aun usado en muchos canales del mundo. El inconveniente principal del método de Froude está en suponer que la resistencia residual del buque es igual a la resistencia del modelo multiplicado por la escala del modelo. Esto no es cierto por que la resistencia residual está formada, en parte, por resistencia del tipo viscoso.

2.1.5.2 MÉTODO DE HUGHES-PROHASKA

Este método descompone la resistencia total como:

$$C_T = (1 + K)C_F + C_w \quad 2.12$$

Tanto el factor de forma (1+K) y el coeficiente de resistencia de olas C_w son asumidas iguales tanto para el modelo como para el buque. De la prueba de canal se determina el coeficiente de resistencia de olas.

El procedimiento es el siguiente:

- Se determina el coeficiente de resistencia total del modelo de la prueba de canal:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_M \times V_M^2 \times S_M} \quad 2.13$$

- El coeficiente de resistencia de olas, que es el mismo para modelo y buque se determina mediante:

$$C_w = C_{TM} - (1 + K)C_{FM} \quad 2.14$$

- El coeficiente de resistencia total del buque es :

$$C_{TB} = C_w + (1 + K)C_{FB} + C_A \quad 2.15$$

- La resistencia total del buque será:

$$R_{TB} = C_{TB} \times \frac{1}{2} \rho_B \times V_B^2 \times S_B \quad 2.16$$

El coeficiente de resistencia friccional de placa plana se determina mediante la fórmula de Hughes:

$$C_F = \frac{0.067}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad 2.17$$

ITTC (International Towing Tank Conference) recomienda universalmente $C_A=0.0004$

El método de Prohaska es un método para determinar el factor de forma. El factor de forma $(1+K)$ es asumido independiente del número de Froude (F_n) y del número de Reynolds (R_n), y es el mismo para modelo y buque.

El factor de forma es determinado por:

$$\frac{C_T}{C_F} = (1 + K) + \frac{\alpha F_n^4}{C_F} \quad 2.18$$

El valor de α en esta ecuación se determina mediante un análisis de regresión, para esto se realizan pruebas en canal a varios números de Froude, los cuales están comprendidos entre 0.12 y 0.24. El método de Prohaska es recomendado por la ITTC 1978

2.1.6 FORMACION DE OLAS

La resistencia por formación de olas en un buque, es el resultado de las fuerzas ejercidas sobre el buque debido a la presión del fluido actuando normalmente en todo el casco, tal como la resistencia friccional es el resultado de las fuerzas tangenciales del fluido.

Todo buque cuando se desplaza, crea un típico sistema de olas que contribuye con la resistencia total al avance. en la literatura, este sistema de olas es a menudo descompuesto en sistema de olas primario y secundario.

2.1.6.1 SISTEMA DE OLAS PRIMARIAS

En el caso de un cuerpo profundamente sumergido, el cual se desplaza horizontalmente a una velocidad constante muy por debajo de la superficie, no se generan olas, pero la presión normal varía a lo largo de su longitud. En un fluido ideal (sin viscosidad) la fuerza neta debido a esta variación será cero, es decir no tendrá resistencia (Paradoja de D'Alembert). Esto se explica porque al ser el fluido ideal, las únicas fuerzas actuantes son normales al cuerpo. En proa actúan hacia popa; mientras que en popa actúan hacia proa y como las fuerzas de proa y popa son iguales la resultante es cero.

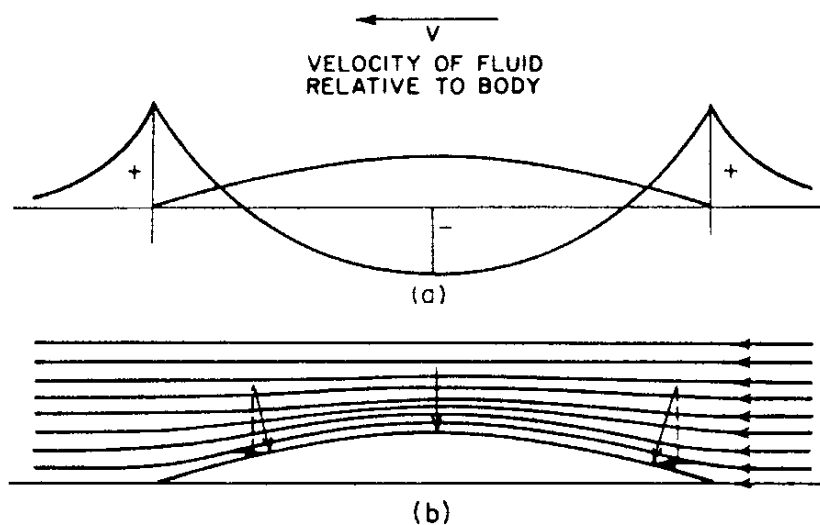


Figura 2-2: Flujo alrededor de un cuerpo sumergido-Zazurca (1972)

Si el cuerpo se mueve en la superficie, esta variación de la presión debajo de la superficie libre, origina olas que alteran la distribución de presión sobre el casco,

la fuerza resultante neta debida a esta distribución, es la resistencia por formación de olas.

Ahora imaginemos un cuerpo que consiste en un casco bajo la superficie del agua y su imagen sobre la superficie de esta. Este doble cuerpo crearía una cierta distribución de presiones en el plano de simetría (superficie del agua) en un fluido ideal infinito. Siguiendo la ecuación de Bernoulli, podríamos expresar la distribución de la elevación superficial (altura de olas) correspondiente para esta distribución de presión, resultando crestas de olas en los extremos del buque y una ola de longitud larga a través del medio. Esto es llamado el sistema de olas primarias del buque. Mientras que la forma de este sistema es independiente de la velocidad., su altura (altura de olas) depende cuadráticamente de esta.

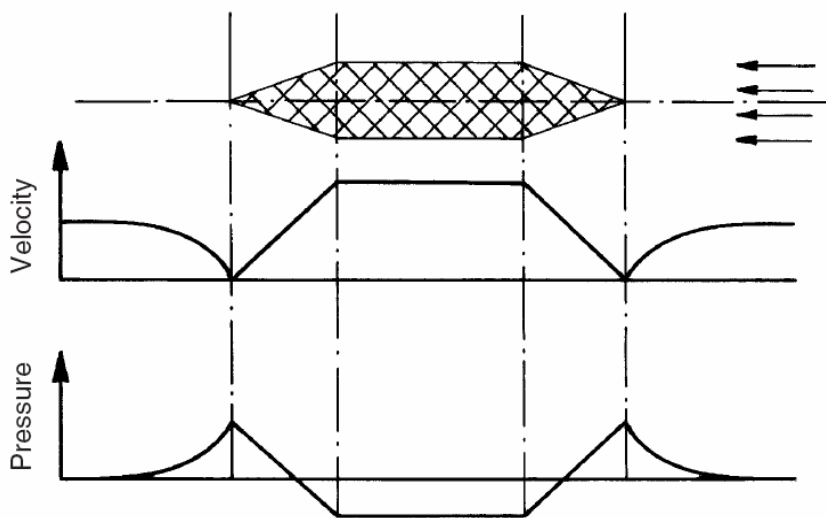


Figura 2-3: Sistema de olas primarias-Volker Bertram (2000)

2.1.6.2 SISTEMA DE OLAS SECUNDARIAS

Cuando un buque se desplaza sobre una superficie libre, un típico patrón de olas es generado el cual se propaga corriente abajo. Aunque el fluido fuera ideal, este patrón de olas contribuirá con la resistencia. Lord kelvin (1887-1904) estudio un simple punto de presión el cual viajaba en línea recta sobre la superficie del agua, generando olas que se combinaban formando un patrón. Este patrón estaba conformado por olas transversales y divergentes las cuales se encontraban limitadas por dos líneas rectas las cuales tenían como origen común el punto de presión y formaban ángulos de $19^{\circ} 28'$ con la línea de movimiento. El patrón de olas de kelvin ilustra y explica muchas de las características del sistema de olas generado por un buque.

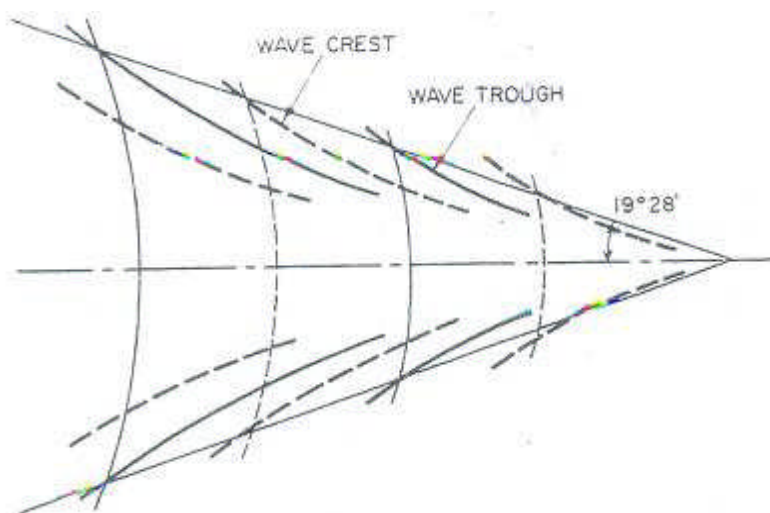


Figura 2-4: Patrón de olas de Kelvin-Lewis (1928)

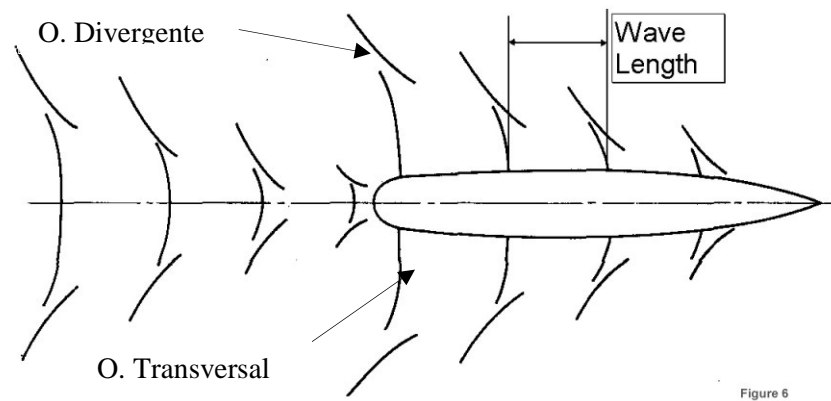


Figura 2-5: Sistema de olas generado por el buque

El sistema de olas transversales se mueve con el barco en la misma dirección y velocidad (V) que este, siendo su longitud de ola.

$$L_w = \frac{2\pi V^2}{g} \quad 2.19$$

El sistema de olas divergentes se mueven con una velocidad ($V \cos \theta$) diferente a la del buque, si la línea normal a sus crestas forma un ángulo θ con el curso del buque entonces la longitud de sus olas será:

$$L_w = \frac{2\pi V^2 \cos^2 \theta}{g} \quad 2.20$$

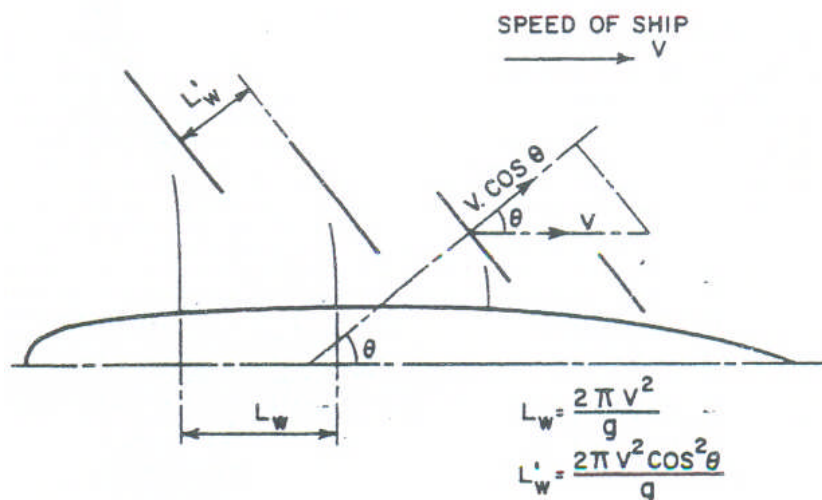


Figura 2-6: Velocidad y longitud de olas divergentes-Lewis (1988)

a. SISTEMA DE OLAS DE PROA

Este sistema se caracteriza por presentar siempre una cresta en la región de la proa

b. SISTEMA DE OLAS DE POPA

Este se caracteriza por presentar siempre un valle en la región de la popa.

2.1.6.3 INTERFERENCIA DEL SISTEMA DE OLAS

El buque durante su movimiento produce varios patrones de olas, los cuales se interfieren unos con otros. Los patrones principales son creados cuando cambios bruscos en la geometría del buque ocurren cerca a la superficie, por ejemplo en el bulbo de proa, en la proa, en la popa y en los hombros de proa y popa. Las interferencias pueden ser positivas o negativas.

a. INTERFERENCIA POSITIVA

La interferencia positiva ocurre cuando dos o más olas avanzando en la misma dirección se encuentran y sus amplitudes se suman, generándose de esta forma una ola de mayor amplitud.

b. INTERFERENCIA NEGATIVA

La interferencia negativa ocurre cuando dos o más olas avanzando en la misma dirección se encuentran y sus amplitudes se restan, produciéndose una ola de menor amplitud.

La figura 2.7 muestra la interferencia negativa del sistema de olas generada por la proa del barco y por el bulbo de proa.

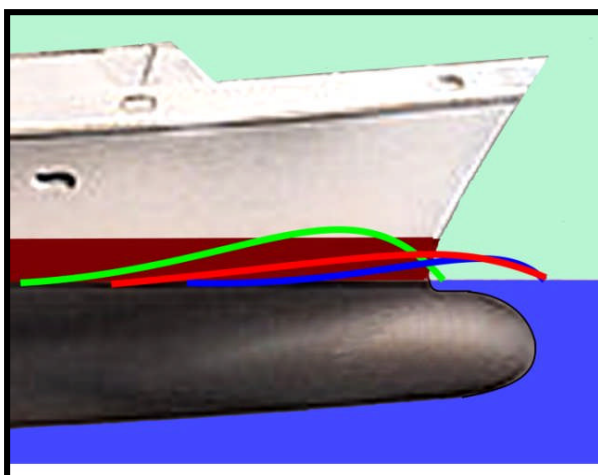


Figura 2-7: Interferencia negativa

- La línea de color verde representa la ola natural de la proa del barco sin bulbo.

- La línea de color azul representa la ola generada por el bulbo.
- La línea roja es la suma de las dos olas.
- La altura de la ola de proa es sustancialmente reducida, como consecuencia de la interferencia negativa del sistema de olas, lo que reduce la resistencia al avance del casco.

La resistencia por formación de olas usualmente ha sido determinada mediante pruebas de canal. Aunque muchos esfuerzos para calcular la resistencia por formación de olas mediante métodos teóricos fueron hechos hace más de 100 años, el problema no pudo ser resuelto satisfactoriamente, hasta la llegada de las computadoras. El inicio de métodos computacionales para el cálculo de la resistencia por formación de olas se le atribuye a Mitchell quien en 1898 propuso una expresión de integración para calcular la resistencia. Hoy, gracias al incremento de la capacidad de procesamiento de las computadoras, los métodos de elementos de contorno (método de paneles) se han convertido en una herramienta estándar para el cálculo de la resistencia por formación de olas, la predicción precisa de esta resistencia solo se acerca a una solución satisfactoria a finales de los años 90.

2.2 BULBO DE PROA

Por bulbo de proa se entiende a todo engrosamiento de volumen situado en la proa, sea protuberante o no más allá de la curva de la roda, sin importar su forma o su tamaño. Esta protuberancia se extiende por delante de la perpendicular de proa. Los bulbos de proa son comunes en las embarcaciones modernas, modelos experimentales comparativos muestran que un buque con bulbo de proa presenta una menor resistencia al avance y requiere por lo tanto de una menor potencia propulsiva que el mismo buque sin bulbo.



Figura 2-8: Bulbo de proa

2.2.1 GENERALIDADES

El bulbo de proa fue descubierto hace más de 120 años. Este descubrimiento desde el punto de vista hidrodinámico se le atribuye a Froude, quien observó la reducción del tren de olas de proa, y por consiguiente de la resistencia al avance, de un torpedero, después de que a este se le había instalado un tubo lanzatorpedos en la

parte baja de la roda. Sin embargo, fue David W. Taylor el primero en reconocer al bulbo de proa como un dispositivo elemental para reducir la resistencia al avance. En 1907 Taylor diseñó el primer bulbo de proa con la finalidad de aumentar la velocidad del acorazado Delaware (BB-28). No fue hasta 1929 que el bulbo fue implementado en el primer barco civil. Una aplicación más amplia en el transporte marítimo no ocurrió hasta 1950, unos años más tarde el primer bulbo para un tanquero, el cual fue diseñado por Schneekluth, fue instalado.

Las bases para la justificación teórica del efecto del bulbo de proa, la cual ha contribuido principalmente al entendimiento de su acción, en buques rápidos se obtuvieron, gracias a los trabajos de Sir Thomas Havelock (1934), sobre las olas dejadas por una esfera, que prepararon el camino para los estudios de W.C.S. Wigley (1935-1936) y G. Weiblum (1936) quienes a partir de la teoría linealizada de la resistencia por formación de olas de proa del buque, atribuyeron su acción a la atenuación del sistema de olas de proa del buque, por superposición con el sistema de olas generado por el propio bulbo. Dependiendo de las diferencias de fase y amplitudes una total cancelación de ambos sistemas de olas puede ocurrir. En los buques rápidos, la posición longitudinal del bulbo causa la diferencia de fases, mientras su volumen, velocidad y proximidad a la superficie libre se relaciona con la amplitud.

Durante los años que median entre estos trabajos pioneros y el decenio de los sesenta, el bulbo se aplicó, con bastante éxito, en buques de velocidad relativamente alta, con números de Froude en torno a 0,30. Estos bulbos solían ser bulbos bajos,

poco protuberantes y de escaso volumen. Un hecho que pudo constatar en esos años, sin que pudiera justificarse, fue el ahorro de potencia que se conseguía con la aplicación del bulbo en petroleros de coeficiente de bloque del orden de 0,85 y con números de Froude menores de 0.2, que si bien eran poco significativos en condición de plena carga, alcanzaban porcentajes del 15 y el 20 por ciento en la condición de lastre.

Inicialmente, por motivos de facilidad de construcción, en embarcaciones de gran porte se usaron formas de bulbos muy simples, de sección transversal prácticamente cilíndrica y localmente muy planas en la zona baja. Al utilizarse este tipo de bulbos en embarcaciones relativamente pequeñas, más veloces y de menor calado, se presentaron problemas de slamming (pantocazo), hasta estos momentos los ensayos de modelos se realizaban solo en aguas calmas. La solución a estos problemas, se consiguió con el análisis de ensayos de modelos en olas y la modificación de la sección transversal del bulbo, pasando de secciones circulares, elípticas o incluso en gota de agua, con zonas muy planas en los pies de cuaderna, a secciones tipo “Peonza” que suavizan la entrada de la roda en el agua, por su forma en V en la zona baja, mientras que el volumen desplazado hacia arriba y la forma plana del bulbo en su parte superior tienen un efecto amortiguador del cabeceo.

Por la década de los 60 Takao Inui, investigador japonés, perfecciono los estudios realizados por Wigley en 1935, demostrando que el campo de aplicación del bulbo podía ser mucho más amplio de los que él en sus trabajos daba a entender ($0,24 < F_n < 0,57$).

En 1965, los trabajos de R. Wahab mostraron que el bulbo no solo no era perjudicial para el comportamiento en la mar, si no que, proyectado adecuadamente, podía beneficiar sensiblemente las condiciones marineras. En ese mismo año Van Lammeren y Wahab (1965) , analizaron el efecto de un bulbo esférico en un buque de carga general, y elaboraron una serie de gráficos para mostrar la influencia de ciertos parámetros (número de Froude, volumen, inmersión del bulbo y semiángulo de entrada) en el efecto del bulbo en la resistencia por formación de olas.

E. Baba (1969), descubrió la resistencia por olas rompientes a través de ensayos experimentales. Concluyendo que esta resistencia depende directamente de la elevación y desarrollo de las olas libres así como también de las locales, en los alrededores del cuerpo de entrada y es un asunto típico de fenómeno de "Spray". Esta nueva componente de la resistencia sería fundamental para que trabajos futuros pudieran explicar la acción del bulbo en buques lentos.

Sharma y Naegle (1970), elaboraron un método teórico- experimental con la finalidad de utilizar la teoría linealizada de olas en buques en los que no podía aplicarse en sentido estricto dicha teoría.

En 1973, E. Eckert y S.D. Sharma en un trabajo puramente experimental, pudieron explicar el ahorro de potencia en buques llenos y lentos, que se había registrado en los años 60 en embarcaciones lentas y llenas, basándose en que el mecanismo de acción del bulbo es radicalmente distinto en dos tipos diferentes de buques. En los buques rápidos actúa por atenuación del sistema de olas de proa, como ya se ha indicado, y reducción, por tanto, de la resistencia por formación de

olas, mientras que en los buques lentos, en la situación de lastre, disminuye la resistencia por olas rompientes, que en estos buques supone porcentajes en torno al 20% de la resistencia total. En la situación de plena carga el ahorro obtenido es menor.

Entender el fenómeno de olas rompientes es importante para el diseño de bulbos de buques lentos, ya que en estos buques la componente de la resistencia por olas rompientes contribuye en gran medida a la resistencia al avance. La resistencia por olas rompientes incluye todas las partes de energía perdida por el rompimiento de olas demasiado pronunciadas en proa. La parte principal de esta energía puede ser detectada por mediciones de la estela.

B.Yim investigador japonés (1974), propuso un método, basado en la teoría lineal, para el diseño de bulbos de proa, para lo cual se basó en las teorías desarrolladas hasta entonces. Su método es de utilización relativamente simple y su campo de aplicación se encuentra dentro de números de Froude comprendidos entre 0,3 y 0,5.

Hasta esta fecha el diseño de bulbos de proa era aun dificultoso debido a la pocos datos de diseño que se tenían, fue así que Kracht (1978) desarrolla un método semi-empírico, muy utilizado actualmente para la selección de las dimensiones del bulbo, el cual se basa en un análisis estadístico de diversas pruebas realizadas a modelos de buques en el canal de Hamburgo HSVA y Berlin VWS.

Kayo y Takemuda (1983), contribuyeron a esclarecer en cierta medida el mecanismo de la generación de las olas rompientes en la proa de buques llenos. Ellos dedujeron que: la variación de la velocidad con la profundidad juega un papel importante en la generación de torbellinos, en herradura, en la proa del buque. Por lo que, concluyeron que el bulbo de proa actúa desacelerando el fluido bajo la flotación y acelerándolo cerca de esta, reduciendo de esta manera la predisposición a la generación de torbellinos y olas rompientes. Y que un bulbo poco sumergido o muy próximo a la flotación tendría un efecto perjudicial.

En su tesis doctoral Carlier (1985), realizó un análisis hidrodinámico del bulbo de proa y propuso un método empírico, basado en un análisis estadístico de la información existente en la base de datos del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo (C.E.H.P), para el diseño de este. Unos años más tarde, García (1991), estableció un criterio de aplicación del bulbo de proa en pesqueros, tras un análisis de los diversos ensayos realizados a embarcaciones pesqueras en el C.E.H del Pardo, así como un procedimiento para determinar la protuberancia óptima, su área e inmersión.

Los bulbos de proa no fueron ampliamente explotados hasta que los programas de computadora de técnicas de moldeamiento permitieron a investigadores de la Universidad de Columbia Británica incrementar su funcionamiento a un nivel práctico en los años 80.

Se ha demostrado mediante modelos experimentales y la teoría lineal que el efecto del bulbo no puede ser reemplazado por variaciones de la forma del casco, es

decir, que un incremento del coeficiente de bloque equivalga a un aumento del volumen del bulbo o que un aumento de la longitud del buque equivalga a un aumento de la longitud del bulbo.

El bulbo además de reducir la resistencia al avance del buque, también influye en otras propiedades de este. Pruebas en modelos han mostrado que los bulbos pueden influir en el coeficiente cuasi-propulsivo, de estela y empuje. Sin embargo, no hay mucha seguridad de si estas influencias están presentes en el buque, esto debido al efecto de escala. Por otro lado, los bulbos de proa parecen no influir significativamente en el curso de la estabilidad y maniobrabilidad, aunque el bulbo se comporte como una “pala” en la roda. En términos de resistencia, pruebas de modelos en olas regulares tienden a mostrar que un buque con bulbo es mejor que uno sin él, independientemente de los aspectos de comportamiento en la mar.

Finalmente no debemos olvidar que: el efecto del bulbo de proa en la resistencia al avance depende no solo de la forma del buque, sino también de la velocidad y de la condición de carga del buque. Por lo que es importante mencionar, que un bulbo que fue diseñado para tener un buen rendimiento en una condición de carga, quizás tenga un rendimiento pobre en otra.

2.2.2 CLASIFICACION DE BULBOS

2.2.2.1 SEGÚN LA FORMA DE LAS SECCIONES

Adoptaremos la clasificación dada por Kracht, según esta los bulbos se agrupan en tres categorías de acuerdo a la forma de la sección transversal en la perpendicular de proa.

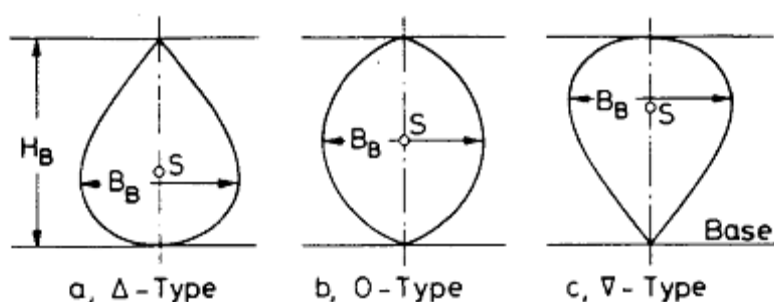


Figura 2-9: Tipos de bulbos-Kracht (1978)

- **Tipo- Δ :** Esta forma de bulbo tiene una sección transversal en forma de gota de agua, con el centro del área en la mitad de la parte baja. Su volumen se encuentra concentrado cerca a la base. El bulbo de Taylor y los bulbos en forma de pera pertenecen a este tipo.
- **Tipo O:** Su sección transversal es de forma ovalada y su centro de área se encuentra ubicado en el medio de esta. Su volumen se concentra en su parte media. Los bulbos circulares, elípticos y en forma de lenteja así como también los cilíndricos pertenecen a este tipo.
- **Tipo- ∇ :** Tiene una sección transversal en forma de gota de agua invertida, con su centro de área situado en la mitad de la parte superior. Su volumen se encuentra concentrado cerca a la superficie libre. Debido a sus favorables

propiedades de comportamiento en la mar, este bulbo es el más usado hoy en día.

2.2.2.2 SEGÚN SU INTERSECCIÓN CON LA CARENA

a. BULBOS INTEGRADOS

Estos tipos de bulbo se unen con la carena con continuidad y suavidad. A continuación mostramos la curva de áreas de un buque sin bulbo y con bulbo.

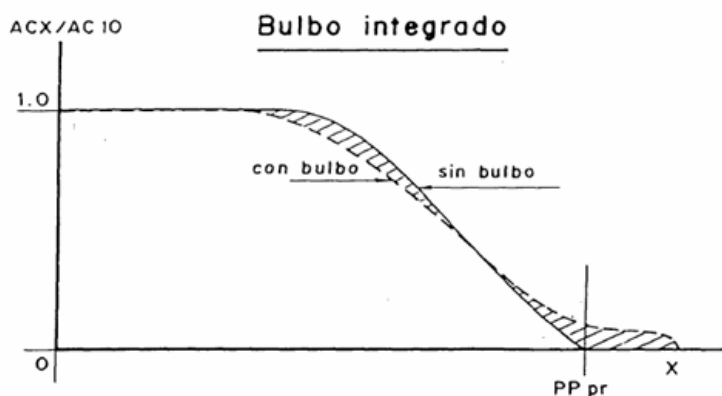


Figura 2-10: Bulbo integrado-Carlier (1985)

b. BULBOS POSTIZOS O ADITIVO

Son aquellos que han sido añadidos a una carena prevista sin bulbo, de forma tal que en la intersección del bulbo con la carena existe una línea de discontinuidad. En la figura 2-11 podemos apreciar la curva de áreas del buque con y sin bulbo. La línea punteada corresponde al buque con bulbo.

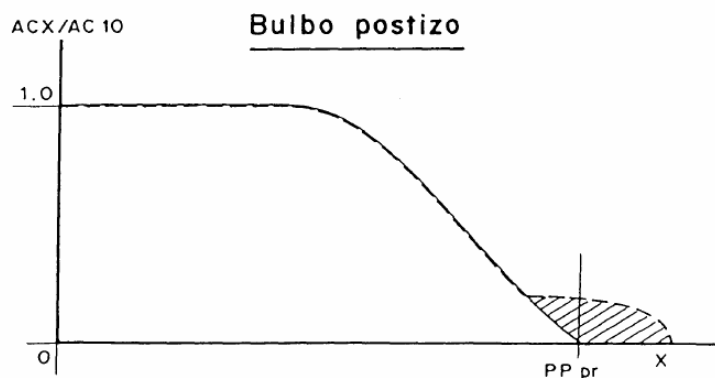


Figura 2-11: Bulbo Postizo-Carlier (1985)

2.2.2.3 SEGÚN EL TIPO DE PERFIL LONGITUDINAL

Dentro de esta clasificación podemos encontrar a los bulbos alto, intermedio y bajo. En la figura 2-12 siguiendo el orden de arriba hacia abajo podemos encontrar al bulbo alto, bajo e intermedio.

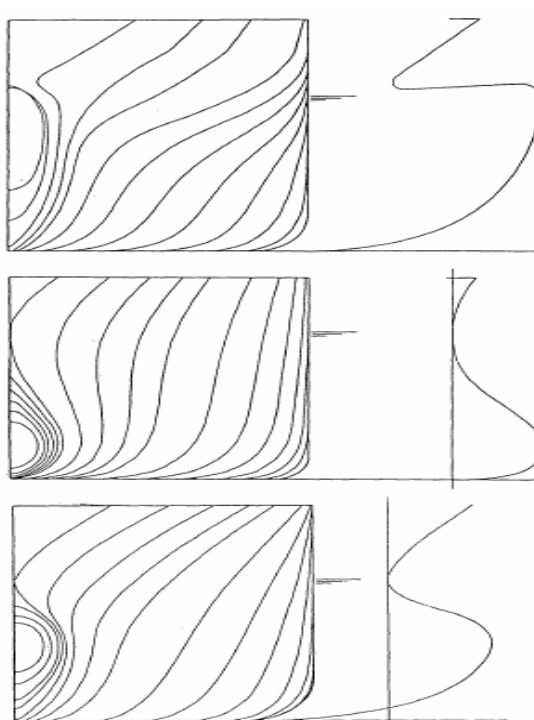


Figura 2-12: Bulbos alto, bajo y normal-Carlier (1985)

2.2.3 PARAMETROS GEOMETRICOS

A continuación se describen los parámetros adimensionales, dados por Kracht, mediante los cuales se determina las dimensiones del bulbo.

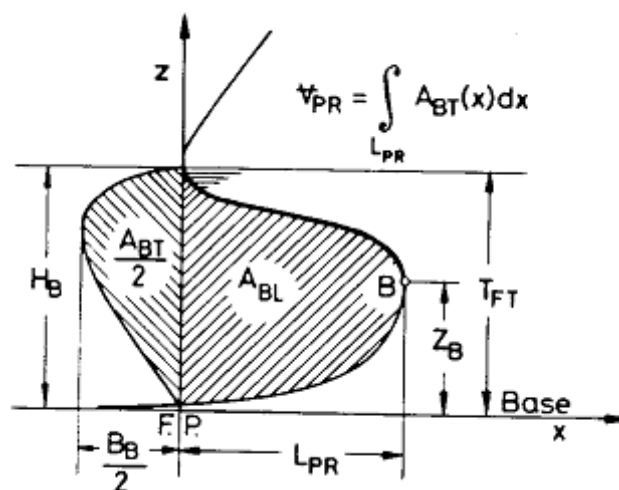


Figura 2-13: Cantidades lineales y no lineales del bulbo-Kracht (1978)

- ✓ **Coefficiente de altura (C_{ZB}).**- es la ordenada sobre la línea de base del punto de protuberancia máxima (Z_B) dividido entre el calado en la perpendicular de proa (T_{FT}) del buque.

$$C_{ZB} = \frac{Z_B}{T_{FT}} \quad 2.21$$

- ✓ **Coefficiente de longitud (C_{LPR}).**- es la abscisa del punto más a proa del contorno longitudinal del bulbo (L_{PR}), referida a la perpendicular de proa dividida entre la eslora entre perpendiculares (L_{PP}) del buque.

$$C_{LPR} = \frac{L_{PR}}{L_{PP}} \quad 2.22$$

- ✓ **Coefficiente de la manga (C_{BB}).**- este es obtenido dividiendo la manga máxima del bulbo (B_B) en la perpendicular de proa entre la manga de la sección maestra del buque (B_{MS}).

$$C_{ZB} = \frac{B_B}{B_{MS}} \quad 2.23$$

- ✓ **Coefficiente de la sección transversal (C_{ABT}).**- este es obtenido dividiendo el área de la sección transversal del bulbo (A_{BT}) en la perpendicular de proa entre el área de la sección maestra del buque (A_{MS}).

$$C_{ABT} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}} \quad 2.24$$

- ✓ **Coefficiente de la sección lateral (C_{ABL}).**- este es obtenido dividiendo el área de la sección longitudinal del bulbo (A_{BL}) entre el área de la sección maestra del navío (A_{MS}).

$$C_{ABL} = \frac{A_{BL}}{A_{MS}} \quad 2.25$$

- ✓ **Coefficiente volumétrico (C_{VPR}).**- este es obtenido dividiendo el volumen del bulbo V_{PR} entre el volumen sumergido del buque V_{WL} .

$$C_{VPR} = \frac{V_{PR}}{V_{WL}} \quad 2.26$$

2.2.4 METODOS DE DISEÑO

Los métodos que se muestran a continuación solo sirven para el cálculo de los parámetros de diseño, dimensiones del bulbo.

2.2.4.1 MÉTODO DE TAYLOR

Taylor considero que el comportamiento de un determinado bulbo estaba caracterizado por los valores de dos parámetros que designo con las letras f y t.

Donde:

- El parámetro (f) es definido como el cociente entre el área de la sección transversal del bulbo en la perpendicular de proa y el área de la sección media del buque.

$$f = \frac{A_{BT}}{A_{MS}} = \frac{EF}{AC} \quad 2.27$$

- Para definir el parámetro (t) se proyecta la curva de áreas hasta la perpendicular de proa, ignorando la curvatura del bulbo. Esto siempre que el bulbo, solo llegue a la perpendicular de proa o este situado tras de esta. En caso contrario se traza, por el punto de corte de la perpendicular de proa con la curva de áreas, una tangente a la curva de áreas cortando a la sección media, de la curva de áreas, en el punto B.

$$t = BD/DC \quad 2.28$$

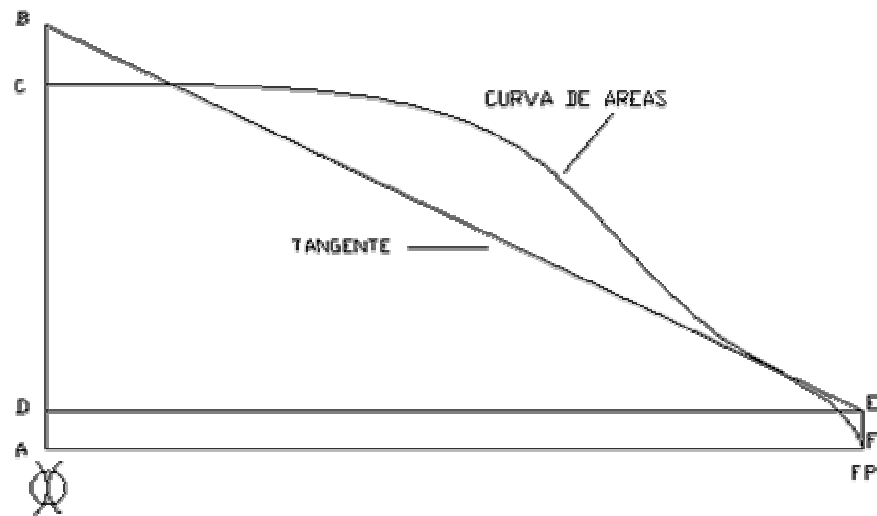


Figura 2-14: Definición del bulbo en términos de f y t

Según la hipótesis histórica de Froude:

$$\frac{R_{RB}}{R_{RM}} = \frac{\Delta_B}{\Delta_M} = \frac{L_B^3}{L_M^3} \quad 2.29$$

De donde se desprende que:

$$\frac{R_{RB}}{\Delta_B} = \frac{R_{RM}}{\Delta_M} \quad 2.30$$

$$\frac{\Delta_B}{L_B^3} = \frac{\Delta_M}{L_M^3} \quad 2.31$$

En los diagramas presentados por Taylor aparecen acotados los valores de la resistencia residual por toneladas de desplazamiento debido a diversas combinaciones de bulbos definidas estas por los parámetros f y t.

Las figuras que a continuación se muestran corresponden a modelos con C_b igual a 0,6435 y relación $\frac{\Delta_M}{\left(\frac{L_M}{1000}\right)^3}$ igual a 150. Donde Δ_M se expresa en toneladas inglesas y L_M en pies.

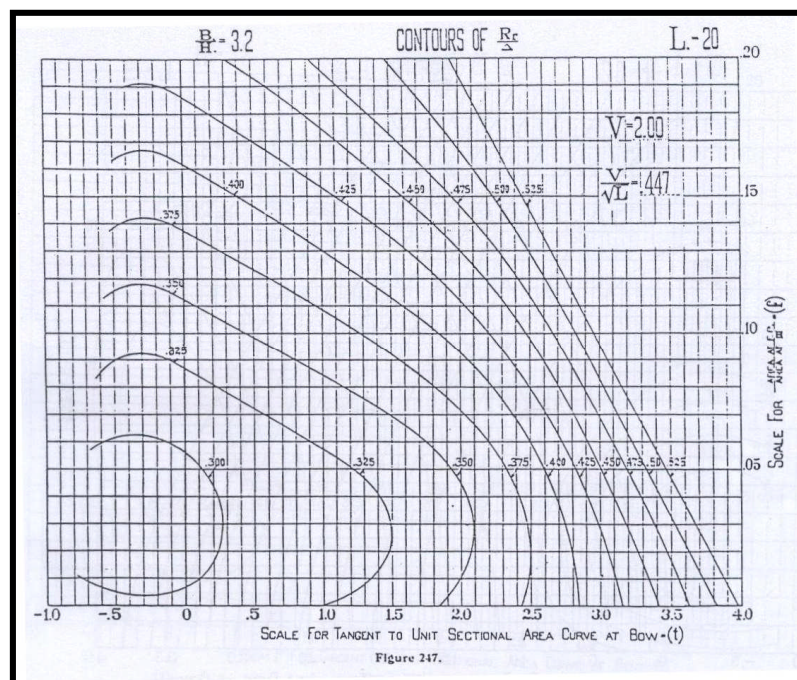


Figura 2-15: Relación de la R_c con los parámetros f y t -Taylor (1933)

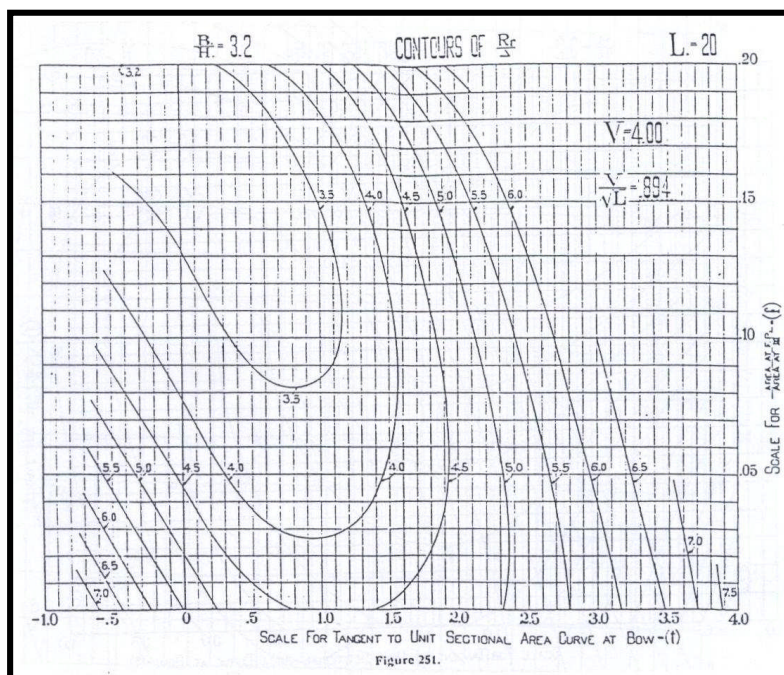


Figura 2-16: Relación de la R_r con los parámetros f y t -Taylor (1933)

En los diagramas mostrados V se expresa en nudos y L en pies.

Para seleccionar el bulbo óptimo es preciso elegir una combinación de los parámetros f y t que minimicen la resistencia residual específica. Este método es de utilidad solo para embarcaciones de alta velocidad.

2.2.4.2 MÉTODO DE KRACHT

Kracht (1978) presento un método semi-empírico para el diseño de bulbos de proa. Su publicación describe un método de diseño cuantitativo de bulbos de proa, junto con los datos necesarios que proporcionan relaciones entre el rendimiento y los parámetros principales de buques y bulbos. Los datos en forma de gráficos de diseño, son derivados de un análisis estadístico de resultado de pruebas de modelos en el Canal de Hamburgo HSV A y Berlín WVS respectivamente. Tres parámetros principales del casco son tomados en cuenta: coeficiente de bloque, relación eslora manga y manga calado, mientras que seis dimensiones del bulbo son seleccionadas y reducidas a parámetros del bulbo de los cuales el volumen, el área transversal en la perpendicular de proa y la longitud de la protuberancia del bulbo son las más importantes. Para la evaluación de la potencia, esta es dividida en dos partes friccional y residual. Dependiendo de los parámetros del bulbo y del número de Froude, seis gráficos de reducción de la potencia residual pueden ser encontrados, para cada coeficiente de bloque del casco base.

La influencia de los parámetros del bulbo en los diferentes efectos de este, son discutidos en forma cualitativa, apoyado por la teoría linealizada de formación de olas y por resultados experimentales. Este conocimiento es importante para el diseño de la forma del bulbo basado en sus parámetros.

A continuación se muestran algunos de los gráficos presentados por Kracht. Estos muestran la relación de los diferentes parámetros del bulbo para cada una de las formas casco-bulbo analizado.

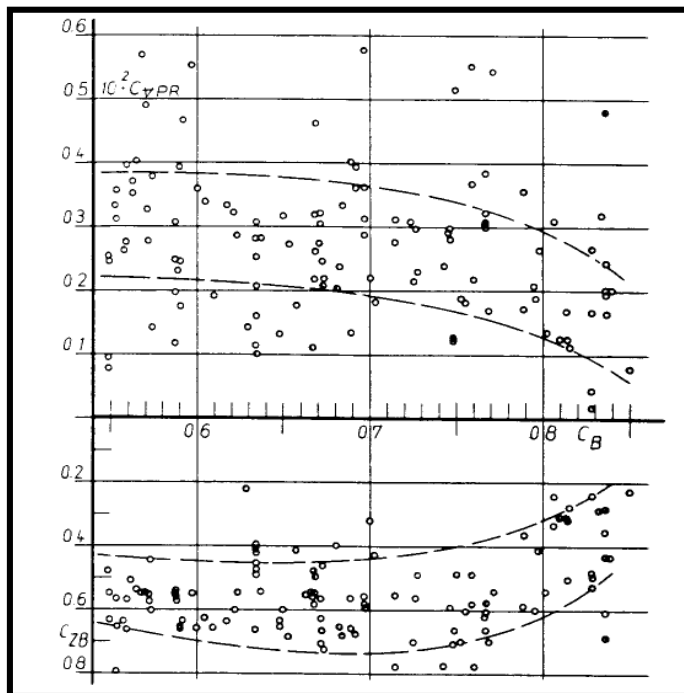


Figura 2-17: Coeficiente bloque vs coeficiente volumétrico y altura-Kracht (1978)

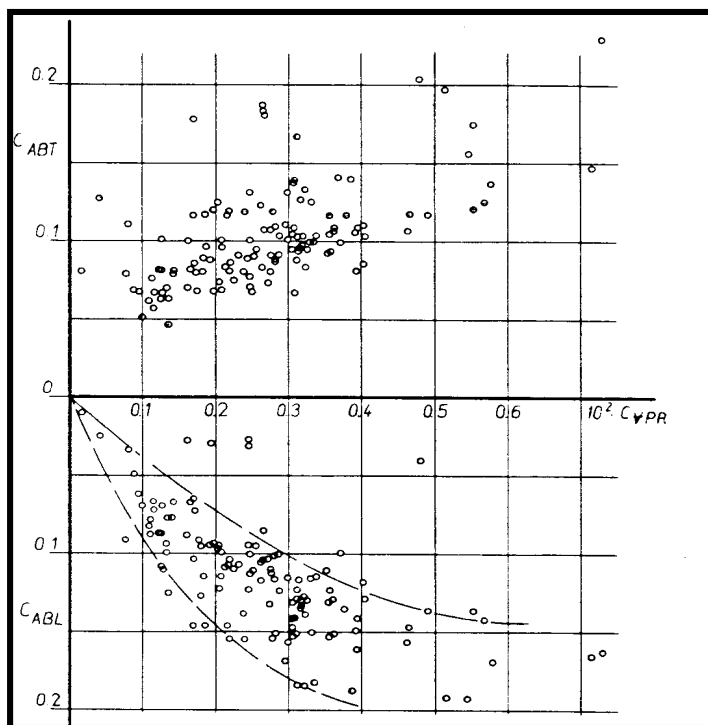


Figura 2-18: Coeficiente lateral y transversal vs coeficiente volumétrico-Kracht (1978)

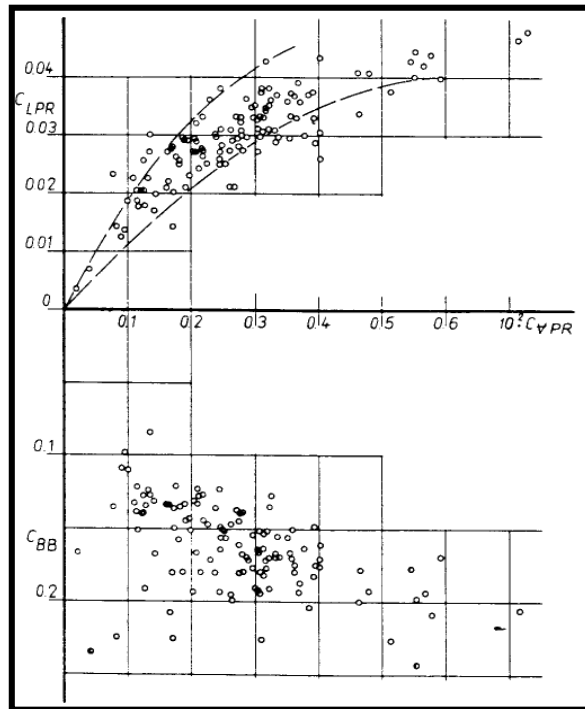


Figura 2-19: Coeficiente de manga y longitud vs coeficiente volumétrico-Kracht (1978)

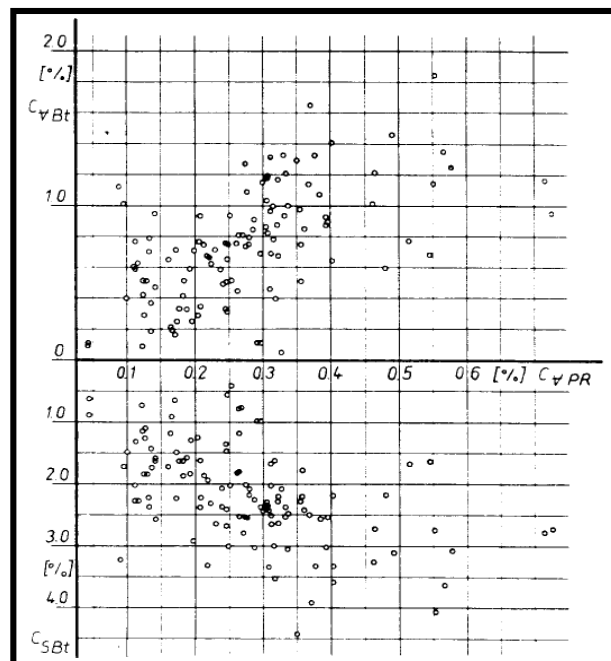


Figura 2-20: Incremento del volumen (C_{VBT}) y de la superficie mojada (C_{SBT}) del casco base debido al bulbo de proa vs coeficiente $[C_{VBT} = \frac{V_{WLC} - V_{WLo}}{V_{WLo}}]$

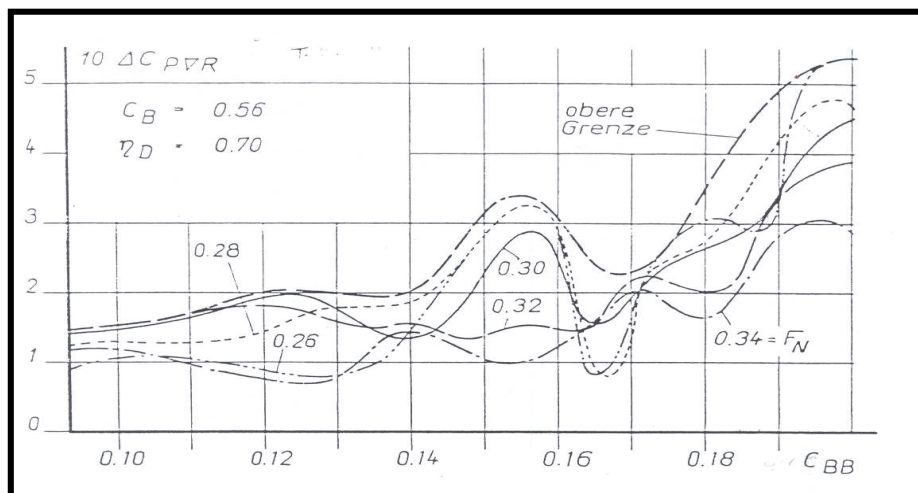


Figura 2-21: Grafico característico de reducción de potencia residual- Kracht (1978)

El uso que Kracht recomienda que se haga de los gráficos de reducción de potencia residual es el siguiente:

- Para cada uno cualquiera de los seis parámetros del bulbo, es posible leer en sus respectivos diagramas el porcentaje de reducción de potencia que corresponde al número de Froude de proyecto. Con este coeficiente de porcentaje de reducción de potencia C_{PVR} se entra en los otros diagramas correspondientes a los restantes parámetros del bulbo, en las curvas adecuadas del número de Froude y se obtiene los valores de los restantes parámetros.
- Si los valores de C_b , L_{PP}/B_{MS} , B_{MS}/T_{MS} correspondientes al buque sin bulbo se hallan comprendidos dentro de la gama analizada experimentalmente, el valor obtenido de C_{PVR} puede ofrecer una garantía razonable. En caso

contrario, el valor obtenido de C_{PVR} ha de recibirse como una aproximación sin garantías.

- No ha de caerse en la tentación de elegir los parámetros correspondientes a un bulbo presuntamente óptimo, seleccionando cada parámetro de modo que proporcione un ahorro máximo, ya que no se tiene ningún conocimiento de la influencia conjunta de tales parámetros por no haberse ensayado, y por lo tanto no se puede emitir ningún juicio sobre su posible resultado.

Las siguientes recomendaciones, según la forma del bulbo, fueron dadas por Kracht.

Tipo O: apropiado para embarcaciones de líneas de forma llenas y finas. Este puede ser instalado en buques con secciones de proa en formas de U o V. El tipo circular deberá ser usado en buques que a menudo operan en mares duros (mala mar), debido a que son menos susceptibles al efecto de slamming (Pantocazo).

Tipo- Δ : bueno para buques con grandes variaciones de calado y que tenga secciones en proa en forma de U. El efecto del bulbo disminuye con el incremento del calado y aumenta con la disminución de este. En condiciones de mar dura el peligro de slamming (Pantocazo) se incrementa con la disminución del calado.

Tipo- ∇ : este tipo de bulbo puede ser utilizado por todo tipo de barco con dos condiciones de navegación claramente definidos plena carga y lastre. Es fácil de instalar en cuerpos de proa con formas de V y tiene en general buen comportamiento en la mar. En condiciones donde se encuentra totalmente sumergido, su efecto de amortiguamiento es muy alto.

2.2.4.3 MÉTODO DE GARCÍA

En 1990, García publicó un procedimiento de predicción de potencia para pesqueros, con esloras comprendidas entre 25 y 60 metros, aplicable tanto a buques con o sin bulbo. También estableció un criterio de aplicación del bulbo de proa en pesqueros, así como un procedimiento para determinar su protuberancia óptima, área e inmersión.

Mencionaremos brevemente el método propuesto por García para la determinación de la potencia, pues a partir de este él deduce las expresiones para determinar las dimensiones del bulbo.

- ✓ La resistencia de la embarcación sin bulbo de proa es obtenida, del análisis de ensayos de remolque de 45 pesqueros sin bulbo de proa, a partir de la siguiente expresión.

$$RR / RT = 1.24 \cdot C_b \cdot B / L_{PP} + 0.265 F_n^2 + 2.151 F_n - 0.298 \quad 2.32$$

- ✓ La siguiente expresión la obtiene, de una muestra de 47 embarcaciones con bulbo de proa, calculando la relación RR/RT de dichas embarcaciones mediante la expresión (2.32), es decir considerando que sus dimensiones corresponderían a una embarcación sin bulbo y calculando, para cada uno de ellos, el porcentaje de desviación entre los valores obtenidos mediante (2.32) y los obtenidos en los ensayos experimentales.

$$\%DES = 100X[(RR / RT)_{SB} / (RR / RT)_{CB} - 1] \quad 2.33$$

Donde los subíndices SB Y CB indican las versiones con y sin bulbo.

- ✓ García observo que los valores de %DES presentaban una clara variación con la relación L_{pp}/B que aproximo mediante:

$$\%DES = ax(L_{pp} / B) + b \quad 2.34$$

Donde a y b son funciones del numero de Froude correspondiente a la protuberancia del bulbo l_B , medido a partir de la cuaderna numero 20 (perpendicular de proa).

$$a = -47.3(F_{NBb})^3 + 292.7(F_{NBb})^2 - 579.7(F_{NBb}) + 351.7 \quad 2.35$$

$$b = 166.7(F_{NBb})^3 - 1037.6(F_{NBb})^2 + 2062.8(F_{NBb}) - 1244.8 \quad 2.36$$

Donde: $F_{NBb} = V/(g \times l_B)^{0.5}$

- ✓ Por tanto, se determina el valor de:

$$(RR/RT)_{CB} = (RR/RT)_{SB} / (1 + \%DES/100) \quad 2.37$$

Donde $(RR/RT)_{SB}$ puede ser determinada mediante la expresión (2.32) o de ensayos experimentales.

Las expresiones para el cálculo de las dimensiones del bulbo son las siguientes:

a. PROTUBERANCIA

La expresión (2.33) y los valores de a y b dados por las expresiones (2.35) y (2.36) permite calcular el valor de F_{NBb} para el que %DES se hace máximo y, por tanto, $(RR/RT)_{CB}$ mínimo para cada relación L_{pp}/B . Esto se logra Haciendo:

$$\partial(\%DES)/\partial(F_{NBb}) = 0 \quad 2.38$$

De la solución de la ecuación (2.38) se obtiene una ecuación de segundo grado en función de F_{NBb} . Aquel valor de F_{NBb} que haga máximo el valor de %DES corresponderá al F_{NBb} óptimo. De esta manera, para una velocidad de servicio dada, se puede determinar la protuberancia óptima del bulbo para cualquier relación L_{pp}/B .

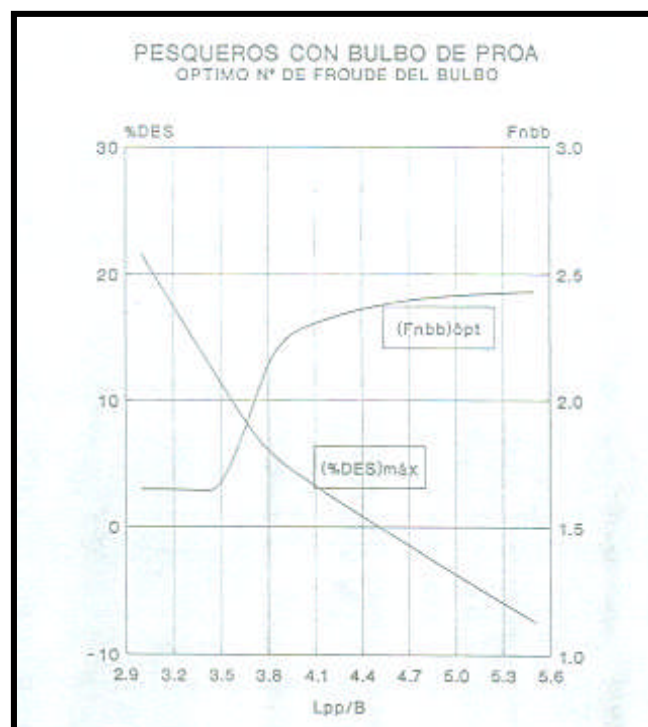


Figura 2-22: Optimo numero de Froude-García (1991)

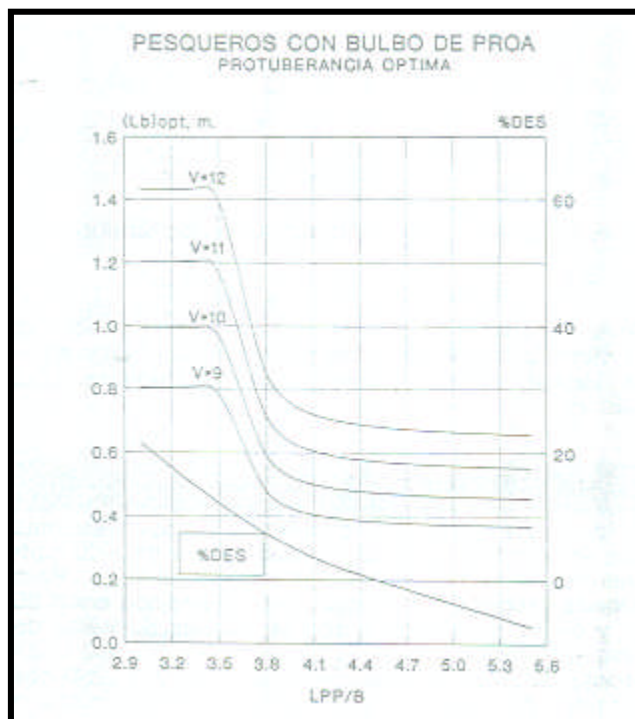


Figura 2-23: Protuberancia óptima-García (1991)

b. ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Para su cálculo es dada la siguiente expresión:

$$A_{20} / A_{10} = 0.08 * C_b - 0.002 \quad 2.39$$

Donde:

- ✓ A_{20} es el área de la sección transversal del bulbo en la perpendicular de proa, cuaderna 20
- ✓ A_{10} es el área de la sección transversal de la cuaderna 10 del buque (sección media).

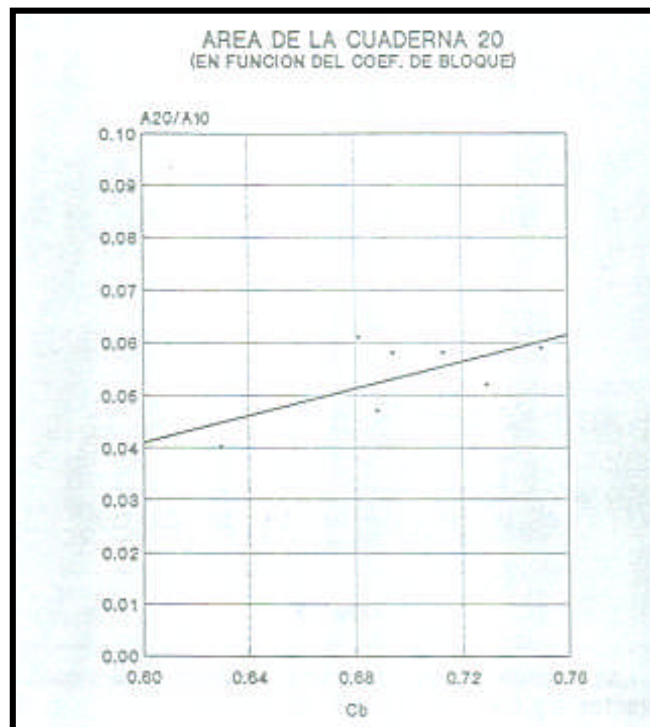


Figura 2-24: Área de la cuaderna 20 en función del Cb-García (1991)

c. ALTURA DEL BULBO

Para su cálculo es dada la siguiente expresión:

$$h/T_{PR} = 0.98 - 3.8C_b \cdot xB / L_{PP} \quad 2.40$$

Donde:

- ✓ h es la inmersión del bulbo
- ✓ T_{PR} es el calado en la perpendicular de proa

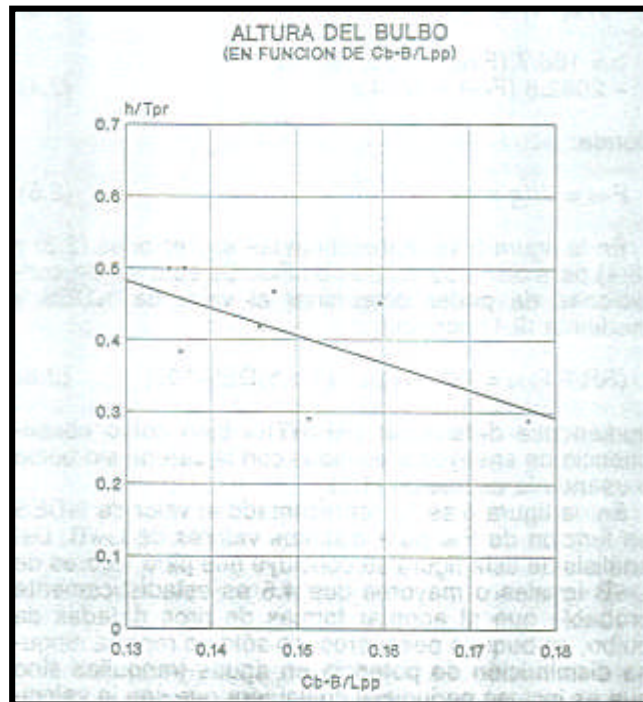


Figura 2-25: Altura del bulbo en función de $C_b \cdot B / L_{pp}$ -García (1991)

García comparó los resultados de los ensayos de remolque de las carenas con bulbo y sin bulbo deduciendo que, en aguas tranquilas, para valores de $L_{pp}/B \geq 4.5$ es estadísticamente probable que la adopción del bulbo de proa sea perjudicial para cualquier velocidad a la que se navegue.

El procedimiento descrito, para el cálculo de la potencia y la determinación de las dimensiones del bulbo, es válido según García dentro del rango siguiente:

$$25 \leq L_{pp} \leq 60 \quad 2.41$$

$$0.25 \leq Fn \leq 0.4 \quad 2.42$$

$$0.095 \leq C_b \cdot B / L_{pp} \leq 0.165 \quad 2.43$$

2.2.4.4 MÉTODO DE CARLIER

En 1985, Carlier en su tesis doctoral realizó un análisis hidrodinámico del bulbo de proa y propuso un método empírico, basado en un análisis estadístico de la información existente en la base de datos del C.E.H (canal de experiencias Hidrodinámicas) del Pardo, para su diseño.

A continuación describiremos los criterios, dados por Carlier, para el diseño de bulbos.

Campo de aplicación del bulbo de proa:

- Para esto utilizo como referencia el número de buques existentes, en la base de datos del C.E.H del Pardo, con y sin bulbo.

$$0.65 < C_b < 0.815 \quad 2.44$$

$$5.5 < L_{pp} < 7 \quad 2.45$$

Dentro de estos valores, más del 95% de los buques actuales dispone de proa de bulbo.

- Para buques rápidos y finos sin producción de olas rompientes

$$0.24 < F_n < 0.57 \quad 2.46$$

- Para buques llenos y lentos

$$F_n \geq 0.16 \quad 2.47$$

- En general, el bulbo no suele ser recomendable si

$$C_b X_B / L_{pp} > 0.135 \quad 2.48$$

Conocer los ahorros de potencia debido a la colocación del bulbo de proa ayudaría a la toma de decisión de colocar al buque un bulbo o no. Carlier propone para este fin la utilización de una versión modificada del método empírico de Hottrop y Menen realizado en 1982 (método estadístico para la determinación de la resistencia al avance).

Los criterios que a continuación se indican para la determinación de las dimensiones del bulbo, son para buques con números de Froude moderados y bajos ($0.14 < F_n < 0.3$). Según Carlier, es un hecho que pueden realizarse variaciones relativamente importantes de la altura, protuberancia y área del bulbo sin deteriorar gravemente el funcionamiento del buque, siendo el parámetro más crítico la altura.

a. ALTURA

Carlier, recomienda en primer lugar determinar la altura del bulbo y realizar un esbozo del contorno de la roda (perfil longitudinal). Los datos básicos para esta operación son los calados operativos en proa. Teniéndose en cuenta lo siguiente:

- El bulbo no tendrá casi ningún efecto sobre el comportamiento del buque en una situación de calados dada, si en ella el coeficiente de altura (C_{ZB}) < 0.35
- El bulbo puede aumentar sensiblemente la resistencia de la carena en aquellas situaciones en que la máxima protuberancia (B) este, sumergida o no, excesivamente próxima a la flotación: $0.8 < C_{ZB} < 1.1$
- En general, puede conseguirse, mediante un proyecto adecuado del bulbo, que la resistencia de la carena sea satisfactoria en situaciones tan ligeras que la línea de agua, en la protuberancia máxima, emerja muy claramente de la

flotación: $C_{ZB} > 1.15$. Para ello las líneas de agua en la zona baja del bulbo deben afinarse. Los bulbos tipo gota de agua invertida son muy favorables para estos casos.

- La altura del bulbo Z_B debe fijarse de forma que la inmersión del bulbo sea aceptable en todas y cada una de las condiciones de calados que sean importantes para la explotación del buque. No debemos olvidar que el bulbo tiene mayor efectividad en las situaciones de calado reducido, por existir mayor propensión a la generación de olas rompientes.
- Para una inmensa mayoría de los buques, Z_B puede valer entre el 35% y el 55% del calado máximo en proa, estando comprendido en un gran número de casos entre el 40% y el 50%. Para primeros tanteos un 45% puede servir como valor de partida.

Un método más adecuado para determinar la altura del bulbo es el siguiente:

Sean T_{prmax} y T_{prmin} , respectivamente, los calados en proa máximo y mínimo en todas las situaciones operativas importantes. La altura del bulbo (Z_B) debe ser la máxima que permita cumplir:

$$h < 0.8 \times T_{prmin} \quad 2.49$$

En el caso de que sea $T_{prmin} < 0.45 \times T_{prmax}$, esta condición, solo puede cumplirse con bulbos tan bajos que serían poco eficaces en plena carga.

En el caso de utilizar un bulbo tipo alto, el calado T_{prmin} deberá estar por debajo de la línea de de agua, en la protuberancia máxima. En este caso puede tomarse $Z_B = 0.75 \times T_{prmax}$, comprobando que en ninguna de las situaciones intermedias el calado en proa este comprendido entre $0,9 \times Z_B$ y $1,1 \times Z_B$.

b. PROTUBERANCIA

Debe tenerse en cuenta que el efecto de la protuberancia en el desfase entre los sistemas de olas del buque y el bulbo solo debe considerarse como muy importante si el buque es rápido ($F_n > 0.3$)

La protuberancia del bulbo puede ser determinada por las siguientes expresiones:

A partir de un buque base:

$$100xLpr^a = 100xLpr + K_1x(C_b^a - C_b) - K_1x\left(\left(\frac{L}{B}\right)^a - \left(\frac{L}{B}\right)\right) \quad 2.50$$

Donde con (b) se indican las características del buque base.

Bulbos bajos (para lastre)

$$Lpr = 0.1811xC_bxB/L + 0.0074 \quad 2.51$$

Bulbos normales y altos (para plena carga y Lastre)

$$Lpr = 0.2642xC_bxB/L - 0.0046 \quad 2.52$$

Donde C_b corresponde a la situación de calado que se desea optimizar

Los valores obtenidos de estas expresiones no proporcionan un valor óptimo de la protuberancia. Las expresiones dadas pueden utilizarse para un rango de valores de número de Froude comprendido entre 0,14 y 0,25. Para valores mayores de F_n conviene utilizar valores de Lpr más elevados, que pueden obtenerse incrementando los valores proporcionados por las formulas entre un 10 a 25% para valores de F_n alrededor de 0.3.

c. ÁREA TRANSVERSAL

Los siguientes valores son dados para el coeficiente de área de bulbo (C_{ABT})

- Atuneros: 5 a 7%
- Cargueros: 7 a 10 %
- Petroleros: 10 a 14%
- Graneleros: 9 a 12%

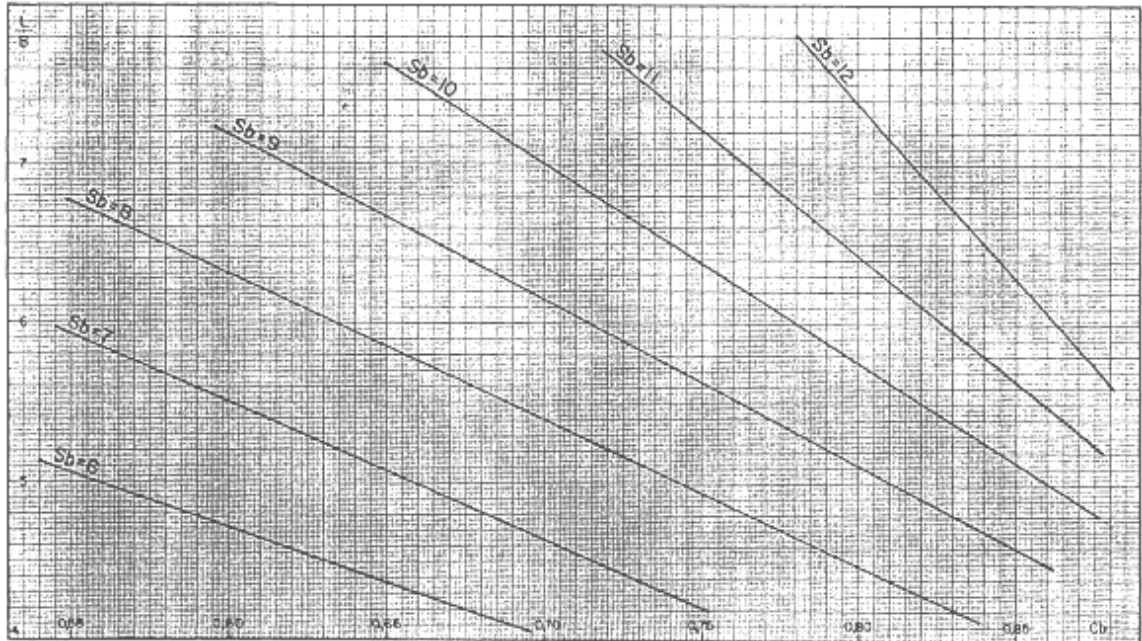


Figura 2-26: valores empíricos de S_b en función de C_b y L/B -Carrier (1985).

Los valores obtenidos son óptimos para $C_{ZB}=0.45$, dichos valores deben aumentarse o reducirse-en 0.1% por cada centésima diferencial de C_{ZB} -para bulbos altos o bajos respectivamente

2.2.5 APLICACIÓN DE BULBOS

2.2.5.1 APLICACIÓN EN GRANDES TANQUEROS Y BUQUES DE CARGA

Este tipo de buques fueron de los primeros en contar con bulbos de proa, por lo que podemos encontrar información abundante en la literatura. Sin embargo, daremos algunos detalles de esta aplicación.

Estos buques cuentan con bulbos de gran protuberancia, se desplazan a bajos números de Froude por lo que su resistencia por formación de olas es relativamente pequeña, alrededor del 5% de la resistencia total. Pruebas con modelos a escala, de buques de coeficiente de bloque en torno a 0.8 y números de Froude alrededor de 1.8, han mostrado que la reducción de la resistencia es de aproximadamente 15 % en condiciones de lastre y de 5% en condiciones de plena carga. Estos resultados han sido confirmados en pruebas de mar.

2.2.5.2 APLICACIÓN EN BARCOS PESQUEROS

Una aplicación de bulbos a embarcaciones pesqueras podemos encontrarlas en barcos arrastreros los cuales se desplazan a números de Froude comprendidos entre 0.3 y 0.37 teniendo una gran resistencia por formación de olas. Por lo que; el uso de bulbos de proa en este tipo de embarcaciones es beneficioso.

Doust (1967) realizó pruebas con modelos de dos arrastreros, los cuales solo se diferenciaban en que uno de ellos estaba provisto de un bulbo. Dos propulsores

fueron probados con cada modelo, uno para desplazamiento libre y el otro para arrastre. Doust concluyo que en general, reducciones en la potencia del orden del 10 a 15 por ciento pueden ser obtenidas, debido a la reducción de la resistencia y al incremento de la eficiencia del propulsor entre un 4% y un 5%, por lo que son posibles reducciones de SHP en aguas calmas del 20%. Además, pruebas en olas regulares indicaron que los barcos con bulbos de proa sufrían una menor reducción de velocidad dentro de su rango de velocidades de trabajo que los barcos con proa convencional.

Heliotis (1985) estudio el efecto de los bulbos de proa en arrastreros de formas similares a los utilizados en Inglaterra. La conclusión de su estudio fue que el uso de un bulbo cilíndrico puede reducir la resistencia total hasta en un 20 por ciento. Además, en las pruebas de comportamiento en la mar el bulbo mostró un efecto ventajoso en reducir el movimiento de Pitching (Cabeceo) y de la aceleración vertical de la proa, a la velocidad de crucero y para longitudes de ola hasta $\frac{\lambda}{L} = 2$.

Se ha demostrado, a través de ensayos, que en este tipo de buques:

- ✓ Aquellos que poseen un número de Froude superior a 0.24 tienen una resistencia por formación de olas muy elevada lo cual supone un porcentaje importante de la resistencia total.
- ✓ El bulbo de proa ejerce en promedio una influencia positiva sobre el rendimiento cuasi-propulsivo global. Salvo excepciones, dicha mejoría se

alcanza gracias a un aumento del rendimiento de la carena al elevarse el valor del coeficiente de estela efectivo.

- ✓ La presencia del bulbo no modifica de forma importante los momentos flectores a que queda sometido el buque-viga en arrufo o quebranto.
- ✓ En plena carga, el bulbo reduce considerablemente los movimientos relativos de la proa respecto a la flotación, reduciendo la posibilidad de inmersión.
- ✓ En situaciones de lastre, el bulbo no afecta sensiblemente la probabilidad de emersión. Su influencia sobre la posibilidad del slamming (pantocazo) es, en general, muy pequeña. Luego las grandes mejorías obtenidas por el bulbo en lastre se reducen algo sobre el comportamiento en mares agitados.
- ✓ El bulbo mueve hacia proa la región de presiones máximas en caso de slamming (pantocazo), lo que se traduce en una reducción de la intensidad de los impactos que permiten mantener, aun en condiciones de mar poco favorables, la velocidad del buque.

2.2.5.3 APLICACIÓN EN BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los buques militares son un claro ejemplo de aplicación de bulbos a embarcaciones de gran velocidad. Un problema que ha surgido en este tipo de buques es la ocurrencia de cavitación en la superficie del bulbo, resultando producto de esto erosión y ruido. A fin de asegurar que la curvatura en la superficie del bulbo no sea lo suficientemente aguda para originar cavitación, determinados cálculos han de ser hechos. Debe ponerse especial atención al pulido de los cordones de soldadura y otras rugosidades en esta área.

Una metodología para el diseño de bulbos de proa para buques de alta velocidad y de formas finas fue propuesta en 1986 por J.W. Hoyle, B.H. Cheng y otros. Este estudio fue realizado usando una fragata como casco de referencia. Nueve variaciones en el diseño del bulbo mas la forma del casco original fueron analizadas usando métodos numéricos. La conclusión más interesante de este estudio fue que los resultados predichos por la computadora y los obtenidos mediante pruebas de canal, mostraban tendencias totalmente similares, mientras que la relativa clasificación de las formas de los bulbos fue idéntica. Además, la adición de un bulbo al casco original parece perjudicar poco las características de comportamiento en la mar del buque.

2.3 CFD-DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Los CFD han experimentado grandes avances y actualmente se utiliza de forma rutinaria en muchos diseños, tanto en barcos de gran tonelaje como en embarcaciones de competición. Hemos de reconocer que esta herramienta es relativamente nueva en el marco de la Ingeniería Naval y actualmente, los CFD no pueden dar una respuesta exacta y completa al proyectista. Sin embargo, la utilización de esta herramienta puede proporcionar información sobre la sensibilidad del proyecto antes ciertos cambios en parámetros básicos del diseño y sobre todo, bajo un aspecto cualitativo.

De acuerdo con Larsson (1994), las más importantes aplicaciones del uso de los CFD son: minimización de la resistencia, hundimiento y trimado, flujo local y transición de ruido. La primera aplicación es la aplicación más común del CFD en la hidrodinámica. La importancia de la predicción del hundimiento y trimado está limitado a determinados casos, como el de aguas poco profundas. La distribución de velocidades en el plano del propulsor es la mas interesante aplicación de la predicción de flujo local y la transición de ruido son de interés particular en aplicaciones navales, que se centran en objetivos militares.

Los código CFD disponibles para el diseño de líneas de formas de cascos pueden ser divididos en dos principales grupos: los cálculos de flujo potencial, dentro del cual se encuentra el método de los paneles, que asume el fluido como no viscoso y aquellos otros códigos que toman en cuentan los efectos viscosos.

La teoría detrás de ambos tipos de cálculos de flujos difiere significativamente, con los métodos potenciales las ecuaciones de movimiento se resuelven de un modo mucho más fácil, aun incluyendo el efecto de la superficie libre y la predicción del sistema de olas creado por el barco, ya que estos no consideran el efecto viscoso. Por lo que estos métodos son mucho más apropiados de ser usados en regiones donde la capa límite es relativamente delgada, región que abarca desde la proa hasta alrededor del 70% de la longitud del buque.

Los CFD viscosos están basados en la solución para un valor medio de las ecuaciones de Navier y Stokes para un flujo incomprensible, y por lo tanto son más apropiados para estudiar el flujo en regiones donde los efectos viscosos son importantes, así como dentro de la capa límite, es decir, en la popa del buque.

2.3.1 REVISION HISTORIA

La utilización de los Canales de Ensayos Hidrodinámicos, a través de la investigación experimental con modelos, ha sido desde hace tiempo el único medio de predicción del comportamiento del flujo y de las fuerzas que actúan sobre el buque.

No obstante, la introducción de análisis matemáticos ha cuestionado la necesidad y prioridad de los ensayos realizados con modelos.

Aunque los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernouilli y Euler establecieron las ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos, su utilización para aplicaciones en ingeniería fue escasa debido a la complejidad de su estructura y falta de recursos numéricos en aquel momento.

En el siglo XIX fueron Navier y Stokes los que establecieron las ecuaciones fundamentales que describen un flujo real en fluidos viscosos. De igual manera seguía ocurriendo que, exceptuando unos pocos casos sencillos para los que podían encontrarse soluciones analíticas, la mayor parte de las veces las ecuaciones no podían resolverse en los casos de interés técnico.

Prandtl desarrolló, a comienzos del siglo XX, la teoría de la capa límite como una simplificación de la solución de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de la capa límite constituyeron el primer medio de análisis de un flujo no sólo en casos de interés académico, sino en situaciones de interés técnico, con las limitaciones impuestas por los medios existentes en su día.

De todas formas, el concepto de capa límite presenta restricciones que limitan su rango de aplicación. En los casos en que existen fenómenos de turbulencias y separación de capa límite es casi obligatorio utilizar las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

La consideración del flujo alrededor de un buque como potencial, permitió a Michell{1898} , el presentar una solución analítica de la resistencia por formación de olas en un buque fino e iniciar el interés de los científicos en hidrodinámica en los métodos numéricos.

Hacia 1970, con el desarrollo de ordenadores de gran potencia, las técnicas de resolución numérica pudieron ponerse en práctica. Desde entonces el desarrollo de algoritmos para la solución no estacionaria de las ecuaciones de Navier-Stokes y la solución para un valor medio (RANSE: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) han avanzado considerablemente. Métodos numéricos como diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos se han utilizado con buenos resultados.

Todo ello ha dado lugar a la aparición de una nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Mecánica de Fluidos Computarizada” (CFD) que se encuentra en fase de desarrollo permanente. Con todos ello se establece un campo de investigación “paralelo” al utilizado en los Canales de Ensayo pero mediante modelos matemáticos.

2.3.2 CFD-SHIPWAVE

En años recientes los Códigos numéricos, basados en la teoría potencial, para la determinación de la resistencia por formación de olas, se han establecido como una herramienta versátil y confiable, de apoyo en las etapas iniciales, de diseño a disposición de los ingenieros navales.

SHIPWAVE, es un código numérico, elaborado en el lenguaje Visual Fortran 90 por Salhua (2004), para la determinación de la resistencia por formación de olas. Este código utiliza el método de paneles basado en la metodología descrita por Nakos (1990), la cual consiste en discretizar las superficies del buque y de la superficie libre donde son distribuidas fuentes de Rankin. Las condiciones de contorno de impenetrabilidad, superficie libre y radiación son colocadas explícitamente; el potencial de velocidades es aproximado a través de superficies B-splines “bi-cuadráticas”.

El método de paneles se puede aplicar a cualquier problema de dinámica de fluidos gobernado por la ecuación de Laplace y constituye el flujo más sencillo pero con sentido físico, el flujo potencial de un fluido incompresible y sin viscosidad.

Cuando la viscosidad no es tomada en cuenta, con lo que no se toma en cuenta los efectos de la turbulencia, las ecuaciones de Navier-Stokes se simplifican y se transforman en las ecuaciones de Euler, que han de ser resueltas junto con las ecuaciones de continuidad. Si el flujo adicionalmente se asume libre de rotación,

obtenemos las ecuaciones de Laplace y Bernoulli. Si solo la velocidad es de interés resolver las ecuaciones de Laplace es suficiente. La ecuación de Laplace es la ecuación fundamental para el flujo potencial en buques. En un flujo potencial, las tres componentes de la velocidad son dependientes entre si y se acoplan mediante la cantidad abstracta "Potencial". La derivada del potencial en cualquier dirección da la componente de la velocidad en esa dirección. El problema se reduce así a la determinación de una componente de la velocidad en lugar de tres. Por supuesto, esto simplifica considerablemente el proceso de cálculo. Como la ecuación de Laplace es lineal ofrece la ventaja adicional que soluciones elementales (fuente, dipolo, Vórtice) se pueden superponer a soluciones arbitrariamente complejas.

La aplicación del método de paneles está limitado a embarcaciones de desplazamiento con número de Froude entre 0.15 y 0.4. La aplicación más común del método de paneles es en la evaluación de varias variantes de proa para seleccionar las formas del casco antes de realizar pruebas experimentales, en canales de experiencia.

El método de paneles no es apropiado del todo para la predicción de resistencia. Simplemente porque las olas rompientes y la presión de origen viscoso no pueden ser capturadas por este método. En lugar de esto, se compara la resistencia por formación de olas de varias formas de cascos con mallados semejantes. Este procedimiento se ha convertido prácticamente en un estándar para el diseño de bulbos de proa.

2.3.2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA HIDRODINÁMICO DE LA RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS

A seguir se describe brevemente la formulación que gobierna el fenómeno de la resistencia por formación de olas.

Se define un sistema de coordenadas $Cxyz$ fijo en el plano medio del navío el cual avanza con velocidad constante U en la dirección positiva del eje x . Esto es equivalente a considerar el navío parado en presencia de un flujo de agua uniforme con velocidad U en la dirección negativa del eje x .

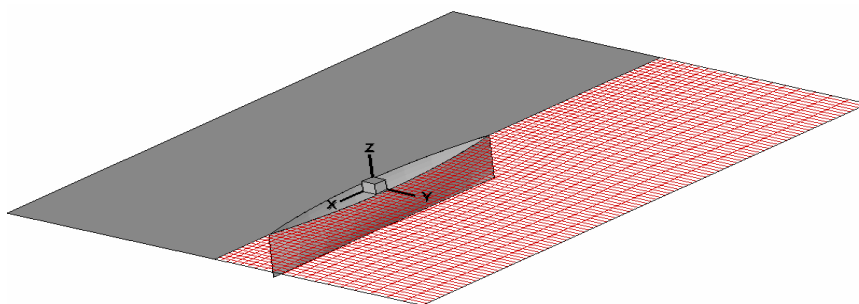


Figura 2-27: Sistema de referencia fijo en el navío, $Cxyz$

a. ECUACIÓN GOBERNANTE

La naturaleza de las olas de gravedad o olas de mar tienen efectos viscosos despreciables, por lo que el agua puede ser considerada un fluido sin viscosidad. El flujo de agua alrededor del navío es asumido incompresible e irrotacional. Entonces la teoría potencial puede ser utilizada, de esta forma el flujo de agua alrededor del navío puede ser representado por un potencial de velocidades (Φ) y la ecuación de la continuidad, que gobierna el comportamiento de los flujos potenciales, toma la forma de la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad 2.53$$

donde :

Φ es el potencial de velocidades total que representa el comportamiento del flujo de agua alrededor del navío.

∇^2 es el operador Laplaciano.

El potencial de velocidades del flujo de agua esta formado por el potencial que representa el flujo de agua incidente ($-Ux$) y el potencial permanente (ϕ_s) que representa la perturbación provocada sobre la superficie libre debida a la presencia del casco (tren de olas de Kelvin).

$$\Phi = -Ux + \phi_s \quad 2.54$$

De esta forma, la ecuación de la continuidad queda definida apenas en función del potencial permanente:

$$\nabla^2 \phi_s = 0 \quad , \text{en todo el dominio fluido} \quad 2.55$$

b. CONDICIONES DE CONTORNO

La ecuación gobernante (2.55) requiere de condiciones de contorno que terminen de representar la física del problema para poder obtener una única solución del potencial de velocidades permanente (ϕ_s).

Debido a que la forma de la superficie es desconocida a priori y las ecuaciones que gobiernan su comportamiento son no-lineales, la solución de este problema requiere un esquema iterativo. Pero es posible simplificar el problema a través de esquemas linealizados, obteniendo resultados de calidad suficiente para ser utilizados en problemas de ingeniería naval, Dawson (1978), Nakos (1990). Esta linealización consiste en considerar el potencial permanente como formado por un potencial base conocido (φ_0) y un potencial de perturbación (φ_1) el cual es desconocido. Las ecuaciones de la superficie libre son linealizadas sobre el flujo base, el cual es conocido y en este caso se usa el flujo del casco doble, Hess & Smith (1964).

$$\phi_S = \varphi_0 + \varphi_1 \quad 2.56$$

donde:

φ_0 : Potencial base del casco doble

φ_1 : Potencial de perturbación

Se considera pequeñas perturbaciones por lo que el área mojada de la superficie del navío es constante y las ecuaciones de la superficie libre son expresadas con respecto al plano $z = 0$. A seguir se muestra las condiciones de contorno del problema linealizadas.

Condición de contorno de impenetrabilidad

Esta es aplicada sobre la superficie mojada del navío, esta garantiza que el flujo de agua no penetre el casco.

Para el potencial base:

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} = U \cdot n_x \quad , \text{ en la superficie media del casco } (S_B) \quad 2.57$$

Para el potencial permanente:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = 0 \quad , \text{ en la superficie media del casco } (S_B) \quad 2.58$$

Condiciones de contorno de la superficie libre

Esta linealización de la superficie libre es conocida como linealización del casco doble, debido al potencial base utilizado.

- ***Condición de contorno cinemática*** – esta ecuación garantiza la igualdad de velocidades entre el agua y el aire.

$$-(\vec{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \zeta_1 = \zeta_1 \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \quad , \text{ en } z = 0 \quad 2.59$$

- ***Condición de contorno dinámica*** – esta ecuación está basada en la ecuación de Bernoulli y es aplicada sobre la superficie libre para

garantizar que la presión en la superficie libre sea igual a la presión atmosférica.

$$-(\vec{U} - \nabla\varphi_o) \cdot \nabla\varphi_1 = -g\zeta_1 + \vec{U} \cdot \nabla\varphi_o - \frac{\nabla\varphi_o \cdot \nabla\varphi_o}{2}, \text{ en } z = 0 \quad 2.60$$

Condición de radiación

Esta condición garantiza que la perturbación provocada por la perturbación sobre el medio fluido provocada por el avance del navío desaparece lejos del cuerpo. Esta puede ser representada considerando que la elevación de la superficie libre y su derivada en el sentido del avance del navío son nulas, Nakos (1990).

$$\zeta_1 = 0 \Rightarrow \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} = 0, \text{ en la parte mas a proa de la superficie libre} \quad 2.61$$

$$\frac{\partial\zeta_1}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2\varphi_1}{\partial x^2} = 0, \text{ en la parte mas a proa de la superficie libre} \quad 2.62$$

2.3.2.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS PANELES

Este método utiliza la Tercera Identidad de Green, la cual satisface implícitamente la ecuación de Laplace, para resolver el problema hidrodinámico formulado anteriormente. Una ventaja de este método, es que permite trabajar únicamente con las superficies del dominio fluido al contrario de trabajar con todo el volumen del dominio fluido como era necesario si se resolviese directamente la ecuación de Laplace. Lo cual simplifica y disminuye bastante el tiempo computacional aplicado.

$$-2\pi\phi_{S(P)} + \iint_{S_T} \phi_{S(Q)} \frac{\partial}{\partial n} G(P,Q) ds - \iint_{S_T} G(P,Q) \frac{\partial}{\partial n} \phi_{S(Q)} ds = 0 \quad 2.63$$

donde:

$$S_T = S_B + S_L$$

S_B : Superficie mojada del casco.

S_L : Superficie libre.

$G(P,Q)$: Función de Green.

La función de Green es definida por el potencial de velocidades de la fuente de Rankine:

$$G(P,Q) = \frac{1}{R(P,Q)} \quad 2.64$$

donde:

$$R(P,Q) = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}$$

(x_P, y_P, z_P) : coordenadas del punto campo.

(x_Q, y_Q, z_Q) : coordenadas del panel fuente.

El dominio fluido es discretizado utilizando paneles cuadrilaterales planos como mostrado a seguir:

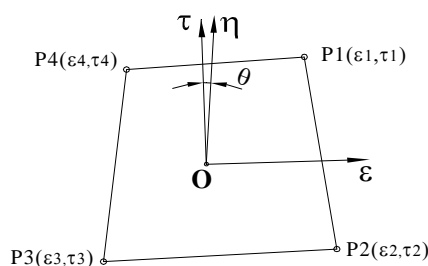


Figura 2-28 – Panel cuadrilateral

El potencial de velocidades es representado utilizando superficies Bsplines “bi-cuadráticas”.

$$\phi(\varepsilon, \tau) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 2.65$$

donde:

(ε, η) : coordenadas del sistema no-ortogonal ε, η

$a(\varepsilon + m, \eta + n)$: coeficiente “spline” en el panel Q

$b(\varepsilon)$ y $b(\eta)$: funciones “spline” cuadráticas en las direcciones ε y η .

Las funciones de interpolación splines son mostradas a seguir:

$$b_m^{(2)}(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{2h\varepsilon^2} \left(\varepsilon + \frac{3h\varepsilon}{2} \right)^2, & -\frac{3h\varepsilon}{2} < \varepsilon < -\frac{h\varepsilon}{2} \\ \frac{1}{h\varepsilon^2} \left(-\varepsilon^2 + \frac{3h\varepsilon^2}{4} \right), & -\frac{h\varepsilon}{2} < \varepsilon < \frac{h\varepsilon}{2} \\ \frac{1}{2h\varepsilon^2} \left(-\varepsilon + \frac{3h\varepsilon}{2} \right)^2, & \frac{h\varepsilon}{2} < \varepsilon < \frac{3h\varepsilon}{2} \end{cases} \quad 2.66$$

donde:

h_ε o h_η son las distancias entre los centróides de los lados del panel Q en las

direcciones ε y η .

$$\begin{aligned}
& 2\pi \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) a_{P(\varepsilon+m, \eta+n)} + \\
& \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{NST} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \left(\iint_{SQ} b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] \\
& - \sum_{Q=1}^{NSL} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{U^2}{g} \left(\iint_{SQ} f_{D-B}(\varepsilon, \eta) G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] = \\
& \sum_{Q=1}^{NSL} \left[f_{base(Q)} \iint_{SQ} G(P, Q) ds \right]
\end{aligned} \tag{2.67}$$

/P=1....NST – NSContorno

Condiciones de radiación en NSContorno:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \varepsilon} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \tag{2.68}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \varepsilon^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \tag{2.69}$$

donde:

NST : número de paneles totales (NST=NSB+NSL+NSContorno).

NSB: número de paneles en el cuerpo

NSL: número de paneles de la superficie libre

NSContorno : número de paneles donde la condición de radiación es aplicada.

a. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS

La diferencia de presiones en la superficie del casco sumergido debido al tren de olas generado por el avance del navío es calculado a través de la integración de presiones en la superficie del casco sumergido.

$$R_w = \iint_{S_B} -n_{x(Q)} P(Q) dS \quad 2.70$$

El coeficiente de resistencia por formación de olas es obtenido por la siguiente ecuación:

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_B} \quad 2.71$$

donde:

$$P(Q) = \frac{\rho(U^2 - |\bar{V}_T|^2)}{2}$$

$$\bar{V}_T = -U\hat{i} + \nabla\phi_S$$

V_T es la velocidad total.

$\nabla\phi_S$ es la velocidad del potencial permanente.

$n_{x(Q)}$ es la componente x del vector normal del panel Q.

ρ es la densidad del agua (ton/m^3).

S_B es la superficie mojada del navío.

2.3.3 CFD- TDYN

A pesar de la utilidad de los cálculos potenciales, basada en que la variación de la resistencia al avance es sensible a las formas del buque a través de la componente por formación de olas, la realidad es que la viscosidad es totalmente necesaria si se quiere analizar el problema en toda su extensión.

Tdyn, es un código numérico que utiliza el método de los elementos finitos, para la simulación dinámica de fluidos, basado en la solución numérica de fluidos incomprensibles y ligeramente comprensibles mediante las ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación del momento) junto con las ecuaciones de continuidad (conservación de la masa) describen totalmente el flujo alrededor de un buque. Sin embargo, estas ecuaciones no pueden ser resueltas analíticamente para geometrías reales de buques. Por lo que la solución para un valor medio (RANSE: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) son usadas para resolver el problema. Estas ecuaciones relacionan las fluctuaciones de turbulencia (Tensores de Reynolds) con las componentes de la velocidad en el promedio del tiempo. Esta relación sólo puede ser suministrada según teorías semiempíricas en un modelo de turbulencia. Es sabido que los modelos de turbulencia están plagados de grandes incertidumbres. Por lo que la elección del modelo de turbulencia influye en los resultados, por ejemplo, en la separación del flujo.

El método de elementos finitos fue originalmente aplicado a problemas de mecánica estructural donde las características matemáticas del modelo eran más apropiadas a la formulación. No obstante con el correr del tiempo este método se ha ido extendiendo en cuanto a sus aplicaciones hasta la actualidad en la cual es muy común ver aplicaciones a problemas de la Ingeniería en general.

2.3.3.1 ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

Las ecuaciones de Navier-Stokes, para un fluido, incompresibles en un dominio tridimensional Ω en el intervalo de tiempo $(0, t)$ pueden ser escritas como:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) &= \rho \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \times (0, t) \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \quad \text{in } \Omega \times (0, t) \end{aligned} \right\} \quad 2.72$$

Donde $\mathbf{u}=\mathbf{u}(x, t)$ representa al vector velocidad y $p=p(x, t)$ el campo de presiones siendo ρ la densidad, μ la viscosidad dinámica del fluido y \mathbf{f} la aceleración volumétrica. La ecuación 2.72 necesita ser combinada con las siguientes condiciones de contorno:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}_c \quad \text{in } \Gamma_D \times (0, t) \\ p &= p_c \quad \text{in } \Gamma_P \times (0, t) \\ \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{g}_1 &= 0, \quad \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{g}_2 = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{u}_M \quad \text{in } \Gamma_M \times (0, T) \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}, 0) &= \mathbf{u}_0(\mathbf{x}) \quad \text{in } \Omega_D \times \{0\} \\ p(\mathbf{x}, 0) &= p_0(\mathbf{x}) \quad \text{in } \Omega_D \times \{0\} \end{aligned} \quad 2.73$$

En las ecuaciones de arriba, $\Gamma := \partial \Omega$ representa los límites del dominio Ω , siendo \mathbf{n} el vector unitario normal y \mathbf{g}_1 y \mathbf{g}_2 los vectores tangentes a la superficie $\partial \Omega$. \mathbf{u}_c es el campo de velocidades en Γ_D (la parte del contorno tipo Dirichlet o el tipo de velocidad fijada), p_c la presión fijada en Γ_p (Contorno de presión fijado). $\boldsymbol{\sigma}$ es el campo de esfuerzo, \mathbf{u}_M el valor de la velocidad normal y \mathbf{u}_0 , p_0 los valores iniciales de los campos de velocidad y presión. La unión de Γ_D , Γ_p y Γ_M debe dar Γ ; su intersección debe ser vacía, debido a que un punto de un contorno puede ser solo parte de uno de los tipos de contornos, a menos que este sea parte del borde entre ellos.

La discretización espacial de las ecuaciones de Navier-Stokes se realiza por medio del método de elementos finitos, mientras que para la discretización temporal un algoritmo iterativo que se puede considerar como implícito de dos pasos "Método de Pasos Fraccionados" es utilizado. Problemas en los que domina la convección se estabilizan por el método "Cálculo de Incremento Finito".

2.3.3.2 ESTABILIDAD DE ALGORITMOS CFD

Usar el método estándar de Galerkin para discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes incomprensibles conduce a inestabilidades numéricas las cuales provienen de dos fuentes.

La primera fuente es debido al carácter abvetivo –difuso de las ecuaciones gobernantes, lo que provoca la aparición de oscilaciones en la solución a altos números de Reynolds, cuando los términos convectivos se vuelven dominantes. La segunda fuente se produce debido el carácter mixto de las ecuaciones lo que limita la

elección de interpolaciones para la velocidad y presión por lo que interpolaciones del mismo orden no pueden ser usadas.

En los últimos años, muchos esfuerzos han sido hechos en la búsqueda de modos de estabilizar las ecuaciones gobernantes muchos de las cuales implican añadir artificialmente términos a las ecuaciones para equilibrar la convención.

Un nuevo método de estabilización, conocido como el método de “Cálculo de Incremento Finito” ha sido recientemente desarrollado. Al considerar el equilibrio del flujo de más de un dominio de tamaño finito, términos de orden superior, naturalmente aparecen en las ecuaciones gobernantes, que suministran la estabilidad necesaria para una clásica discretización de Galerkin de elementos finitos que se usa con interpolaciones de igual orden de velocidad y presión

2.3.3.3 TEORIA BASICA

a. FORMULACION DE CÁLCULO DE INCREMENTO FINITO

Para mostrar este método consideremos el problema de flujo asociado con la conservación de masa incomprensible en un dominio de una fuente 2D de tamaño finito definido por 4 nodos, como en la figura

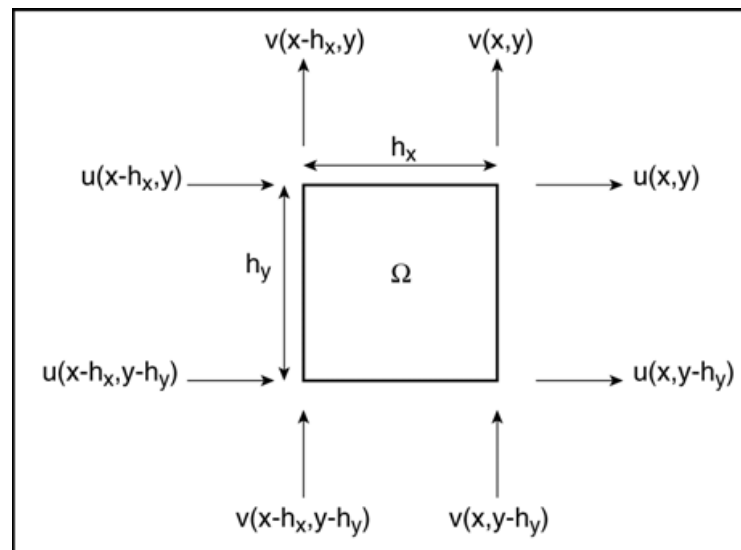


Figura 2-29 – Balance de masa en dos dimensiones

Consideremos el problema de flujo (balance de masa) a través del dominio, tomando el promedio de las velocidades nodales para cada superficie.

$$\begin{aligned} & \frac{h_y}{2} (u(x-h_x, y) + u(x-h_x, y-h_y) - u(x, y) + u(x, y-h_y)) + \\ & \frac{h_x}{2} (u(x, y-h_y) + u(x-h_x, y-h_y) - u(x-h_x, y) + u(x, y)) = 0 \end{aligned} \quad 2.74$$

Esta ecuación representa el balance de masa en un dominio rectangular

Ahora expandimos estas velocidades usando expansiones de Taylor, conservando hasta los términos de segundo orden. Escribimos $u(x, y) = u$

$$u(x-h_x, y) = u - h_x \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{h_x^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - O(h_x^3) \quad 2.75$$

Y similarmente para las otras dos componentes de la velocidad.

Sustituyendo estas ecuaciones de nuevo en la ecuación original de balance de flujo da, después de una simplificación:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h_x}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) - \frac{h_y}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad 2.76$$

Esta ecuación 2.74 es la ecuación de balance estabilizada de masa 2D.

Notemos que como el tamaño del domino tiende a cero, es decir h_x y h_y tienden a cero, la forma estándar de la ecuación de balance de masa incomprensible se recupera.

Los términos subrayados en la ecuación 2.76 proporcionan la estabilización necesaria para permitir la aplicación de una discretización estándar de Galerkin de elementos finitos. Estos términos vienen de admitir que la forma estándar de las ecuaciones es un límite inalcanzable en la discretización por elementos finitos, es decir, admitiendo que el tamaño de elemento no puede tender a cero, que es la base para el método de elementos finitos. Esto también permite interpolaciones de igual orden de velocidad y presión para ser usado.

b. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES ESTABILIZADAS

La metodología del cálculo de incremento finito es usada para formular formas estabilizadas de las ecuaciones de equilibrio de momentos y masa y de las condiciones de contorno de Neumann.

El campo de velocidades y presiones de un fluido incomprensible moviéndose en un dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^d (d = 2,3)$ puede ser escrito por medio de las ecuaciones incomprensibles de Navier-Stokes

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j} &= \rho f_i \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \quad i, j = 1 \div N \end{aligned} \quad 2.77$$

Donde $1 \leq i, j \leq d$, ρ es la densidad del fluido, u_i es la i -ésima componente del campo de velocidades \mathbf{u} en el sistema global de referencia x_i , p es el campo de presiones y s_{ij} es el tensor de esfuerzo viscoso definido por:

$$s_{ij} = 2\nu \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.78$$

La forma estabilizada (FIC) de las ecuaciones diferenciales gobernantes 2.77 puede ser escrita como:

$$r_{m_i} - \frac{1}{2} h_{ij}^m \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_j} = 0 \quad in \Omega \quad 2.79$$

$$r_d - \frac{1}{2} h_j^d \frac{\partial r_d}{\partial x_j} = 0 \quad in \Omega \quad 2.80$$

La convención para la suma de índices repetidos en productos y derivadas se utiliza al menos que se especifique lo contrario. En las ecuaciones de arriba los

términos r_{mi} y r_d representa el residuo de la ecuación 2.77 y h_{ij}^m, h_j^d son las distancias de longitud característica, representado las dimensiones de un dominio finito donde el equilibrio de masa y momento se cumple. Detalles de la obtención de las ecuaciones estabilizadas (FIC) y recomendaciones para el cálculo de los términos estabilizados puede ser encontrado en Oñate 1998.

Las condiciones de contorno para el problema estabilizado a ser considerado son (Oñate 2004)

$$\begin{aligned} n_j \sigma_{ij} - t_i + \frac{1}{2} h_{ij}^m n_j r_{m_i} &= 0 \quad \text{on } \Gamma_t \\ u_j &= u_j^p \quad \text{on } \Gamma_u \end{aligned} \quad 2.81$$

Donde t_i, u_j^p son las tracciones de superficie fijada y σ_{ij} es el esfuerzo total definido como.

$$\sigma_{ij} = s_{ij} - p\delta_{ij}$$

Donde las ecuaciones 2.79 y 2.80 son el punto de partida para la derivación estabilizada FEM para solucionar las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes. Una característica interesante de la formulación FIC es que permite usar interpolaciones del mismo orden para las variables de velocidad y presión. (García Espinosa 2003, Oñate 2004).

Forma integral estabilizada

La forma residual de las ecuaciones de equilibrio de masa de las ecuaciones de momento, puede ser obtenido (Oñate 2004)

$$\frac{\partial r_d}{\partial x_i} = \frac{h_{ii}^m}{2a_i} \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_j} \quad \text{no sum in } i$$

$$a_i = \frac{2\mu}{3} + \frac{u_i h_i^d}{2} \quad \text{no sum in } i$$

Sustituyendo las ecuaciones dadas en la ecuación 2.78 y conservando solo los términos que envuelven las derivadas de r_{m_i} con respecto a X_i nos lleva a la siguiente expresión alternativa para la ecuación estabilizada de equilibrio de masa.

$$r_d - \sum_{i=1}^{n_d} \tau_i \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_i} = 0, \quad \tau_i = \left(\frac{8\mu}{3h_{jj}^m h_j^d} + \frac{2\rho u_i}{h_{ii}^m} \right)^{-1} \quad \text{no sum in } i \quad 2.82$$

El τ_i en la ecuación 2.82 cuando se multiplica por la densidad son equivalente a los *parámetros de tiempo intrínsecos*, visto ampliamente en la literatura de estabilización. Lo interesante de la ecuación 2.82 es que introduce el primer espacio derivados de las ecuaciones de momento en la ecuación de equilibrio de masa. Estos términos tienen propiedades intrínsecas de una buena estabilidad, como se explica a continuación.

La forma ponderada residual del momento y ecuaciones de equilibrio de masas es escrita como:

$$\int_{\Omega} v_i \left[r_{m_i} - \frac{1}{2} h_j \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_j} \right] d\Omega + \int_{\Gamma_t} v_i \left(n_j \sigma_{ij} - t_i + \frac{1}{2} h_j n_j r_{m_i} \right) d\Gamma = 0 \quad 2.83$$

$$\int_{\Omega} q \left[r_d - \sum_{i=1}^N \tau_i \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_i} \right] d\Omega = 0$$

Donde v_i , q son funciones de ponderación genéricas. La integración por parte de los términos residuales en susodichas ecuaciones conduce a:

$$\int_{\Omega} v_i r_{m_i} d\Omega + \int_{\Gamma_t} v_i (n_j \sigma_{ij} - t_i) d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{1}{2} h_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} r_{m_i} d\Omega = 0 \quad 2.84$$

$$\int_{\Omega} q r_d d\Omega + \int_{\Omega} \left[\sum_{i=1}^N \tau_i \frac{\partial q}{\partial x_i} r_{m_i} \right] d\Omega - \int_{\Gamma} \left[\sum_{i=1}^N q \tau_i n_i r_{m_i} \right] d\Gamma = 0$$

Dejaremos de lado de aquí en adelante la tercera integral en la ecuación 2.84 suponiendo que las r_{m_i} es insignificante en los contornos. Las tensiones y los términos de presión en el segundo término de la integral en la ecuación 2.84 son integrados por partes de una manera usual. La ecuación de momento resultante y ecuación de equilibrio de masa son:

$$\int_{\Omega} v_i \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} p \right) d\Omega - \quad 2.85$$

$$- \int_{\Omega} v_i \rho f_i d\Omega - \int_{\Gamma_t} v_i t_i d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{h_j}{2} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} r_{m_i} d\Omega = 0$$

y

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \int_{\Omega} \left[\sum_{i=1}^N \tau_i \frac{\partial q}{\partial x_i} r_{m_i} \right] d\Omega = 0 \quad 2.86$$

En la derivación del término viscoso en la ecuación 2.85 se ha utilizado la identidad siguiente para fluidos incomprensibles (antes de la integración por partes).

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j} = 2\mu \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Proyecciones de gradiente convectivo y presión

La computación de los términos residuales son simplificadas si nosotros introducimos el gradiente de proyección convectivo y de presión c_j y π_i , respectivamente definida como:

$$c_i = r_{m_i} - u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\pi_i = r_{m_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

Podemos expresar el termino residual en al ecuación 2.85 y 2.86 en términos de c_i y π_i respectivamente que luego se convierten en variables adicionales. El sistema de ecuaciones integrales es ahora aumentado en el número necesario

mediante la imposición de que los residuos desaparecen. Esto da el siguiente sistema final de ecuaciones gobernantes:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} v_i \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} p \right) d\Omega - \int_{\Omega} v_i \rho f_i d\Omega - \\
& - \int_{\Gamma_i} v_i t_i d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{h_k}{2} \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + c_i \right) d\Omega = 0 \\
& \int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \int_{\Omega} \left[\sum_{i=1}^N \tau_i \frac{\partial q}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \pi_i \right) \right] d\Omega = 0 \\
& \int_{\Omega} b_i \left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + c_i \right) d\Omega = 0 \quad \text{no sum in } i \\
& \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \pi_i \right) d\Omega = 0 \quad \text{no sum in } i
\end{aligned} \tag{2.87}$$

Siendo $i, j, k = 1 \div N$ y b_i, w_i las funciones ponderadas apropiadas

La integración monolítica esquema temporal

En esta parte una integración monolítica esquema temporal, basado en un esquema corrector predictor de la ecuación 2.87 es presentado.

Veamos primero la discretización en el tiempo del momento estabilizado ecuación 2.79, usando la regla trapezoidal (o método de θ) como (ver Zienkiewicz 1995)

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\delta t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j)^{n+\theta} \right) + \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial s_{ij}^{n+\theta}}{\partial x_j} - \\
& - \rho f_i^{n+\theta} - \frac{1}{2} \rho h_{mj} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_j^{n+\theta} \frac{\partial u_i^{n+\theta}}{\partial x_j} + c_i^{n+\theta} \right) = 0
\end{aligned} \tag{2.88}$$

Donde los subíndices n y θ se refieren al paso del tiempo y a la regla trapezoidal del parámetro de discretización, respectivamente. Para $\theta = 1$, el sistema estándar de Euler es obtenido, que tiene un error temporal de $O(\Delta t)$. El valor de $\theta = 0.5$ da un esquema estándar de Crank Nicholson, que es de segundo orden promedio en el tiempo $O(\Delta t^2)$.

Un método implícito de pasos fraccionados puede ser simplemente derivado por la división de la ecuación de 2.88 como se muestra:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{u_i^{*,n+1} - u_i^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j)^{n+\theta} \right) + \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial s_{ij}^{n+\theta}}{\partial x_j} - \\ - \rho f_i^{n+\theta} - \frac{1}{2} \rho h_{mj} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_j^{n+\theta} \frac{\partial u_i^{n+\theta}}{\partial x_j} + c_i^{n+\theta} \right) = 0 \end{aligned} \quad 2.89$$

$$u_i^{n+1} = u_i^{*,n+1} - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right)$$

Por otro lado sustituyendo el ultimo termino de la ecuación 2.89 en la ecuación 2.80 y después de algo de algebra se llega a la siguiente ecuación alternativa de equilibrio de masa.

$$\rho \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} - \Delta t \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} (p^{n+1} - p^n) + \sum_{i=1}^N \tau_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} + \pi_i^{n+1} \right) = 0 \quad 2.90$$

La forma residual ponderada de las ecuaciones de arriba puede ser escrita como:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} v_i \rho \left(\frac{u_i^{*,n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_j^{*,n+\theta} \frac{\partial}{\partial x_j} u_i^{*,n+\theta} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i^{*,n+\theta}}{\partial x_j} - \delta_{ij} p^n \right) d\Omega - \\
& - \int_{\Omega} v_i \rho f_i^{n+\theta} d\Omega - \int_{\Gamma_t} v_i t_i^{n+\theta} d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{h_k}{2} \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \left(u_j^{*,n+\theta} \frac{\partial u_i^{*,n+\theta}}{\partial x_j} + c_i^n \right) d\Omega = 0 \quad 2.91 \\
& \int_{\Omega} q \left(\rho \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} - \Delta t \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} (p^{n+1} - p^n) \right) d\Omega + \int_{\Omega} \tau_i \frac{\partial q}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} + \pi_i^{n+1} \right) d\Omega = 0 \\
& \int_{\Omega} v_i \left[u_i^{n+1} - u_i^* + \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right) \right] d\Omega = 0 \quad \text{no sum in } i
\end{aligned}$$

Llegado a este punto, es importante introducir la estructura de la matriz asociada correspondiente a la forma variacional FEM discreta de la ecuación. 2.91

$$\begin{aligned}
& M \frac{1}{\delta t} \bar{U}^{n+1} - M \frac{1}{\delta t} U^n + K (\bar{U}^{n+\theta}) \bar{U}^{n+\theta} + \\
& + S_1 \bar{U}^{n+\theta} + S_2 C - GP^n + M_{\Gamma_t} T = F \\
& (\delta t L + L^2) P^{n+1} + D^{\tau_2} \Pi + G^T \bar{U}^{n+1} = \delta t L P^n \\
& M \frac{1}{\delta t} U^{n+1} - M \frac{1}{\delta t} \bar{U}^{n+1} - GP^{n+1} - GP^n = 0 \\
& \qquad \qquad \qquad NU^{n+1} + MC = 0 \\
& \qquad \qquad \qquad GP^{n+1} + M\Pi = 0
\end{aligned}$$

Donde U, P son los vectores del campo de presión y velocidad nodal, T e s el vector de tracciones fijada y π , C *los vectores de* las proyecciones del gradiente de presión y convectividad. Los términos indicados con la barra superior identifican la velocidad intermedia obtenida de la ecuación de movimiento fraccionaría

El sistema de ecuaciones de arriba incluye un error debido a la división de las ecuaciones de momento. Este error puede ser eliminado considerando el sistema análogo de ecuaciones.

$$\begin{aligned}
M \frac{1}{\delta t} U_{i+1}^{n+1} - M \frac{1}{\delta t} U^n + K(U_i^{n+\theta}) U_{i+1}^{n+\theta} + & 2.92 \\
+S_1 U_{i+1}^{n+\theta} + S_2 C_i - GP_i^{n+1} + M_{\Gamma_i} T = F & \\
\delta t L [P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}] + L^{\tau_2} P_{i+1}^{n+1} + D^{\tau_2} \Pi + G^T U_{i+1}^{n+1} = 0 & \\
NU_{i+1}^{n+1} + MC_{i+1} = 0 & \\
GP_{i+1}^{n+1} + M\Pi_{i+1} = 0 &
\end{aligned}$$

Donde i es el contador de iteración del sistema monolítico. Básicamente, en esta formulación final, la convergencia del esquema resultante monolítico inacoplado es hecha cumplir por el primer término de la segunda ecuación de 2.92 (ver Soto 2001).

c. SOLUCIONADORES DE TURBULENCIA

A altos números de Reynolds el flujo se vuelve turbulento y las resultantes fluctuaciones en la velocidad necesitan ser tomadas en cuenta en los cálculos. Un proceso conocido como promedio de Reynolds [] es aplicado a las ecuaciones gobernantes mediante la cual las velocidades, u_i son divididas en media y una fluctuación de las componentes, donde la componente fluctuante, u_i' , es definida por:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i'$$

donde

$$\bar{u}_i(x, t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u_i(x, t + \tau) d\tau$$

Esto lleva a términos adicionales en las ecuaciones gobernantes que pueden ser escritos en función del tensor de “esfuerzos de Reynolds”, definido en coordenadas cartesianas como:

$$\tau_{ij}^R = -\overline{\rho u_i' u_j'}$$

Dado que el proceso de promedio de Reynolds ha introducido términos adicionales en las ecuaciones gobernantes, necesitamos información adicional para resolver el sistema de ecuaciones. Para relacionar estos términos a las variables de flujo, un modelo de la turbulencia es necesario.

Una gran cantidad de modelos de turbulencia existen de diversa complejidad, de los simples modelos algebraicos hasta los basados en dos ecuaciones diferenciales parciales. Los modelos más complejos han incrementado la precisión a costa de un mayor tiempo computacional. Es por lo tanto importante usar el modelo mas simple que de resultados satisfactorios.

Varios modelos de turbulencia como Smagorinsky, k , k-e, k-w, k-kt y Spalart Allmarax han sido implementados en Tdyn. La forma final de las llamadas Reynolds Averaged Navier Stokes Ecuation (RANSE) usando estos modelos son:

$$r_{mi} - \frac{h_{mj}}{2} \frac{\partial r_{mi}}{\partial x_j} = 0 \quad \text{on } \Omega, i, j = 1, 2, 3. \text{ No sum in } i \quad 2.93$$

$$r_d - \frac{h_{dj}}{2} \frac{\partial r_d}{\partial x_j} = 0 \quad \text{on } \Omega, j = 1, 2, 3 \quad 2.94$$

Las ecuaciones 2.93 y 2.94 son las ecuaciones estabilizadas de equilibrio de momento y masa.

$$r_{mi} = \rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \rho f_i$$

$$r_d = \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

Donde μ_T es la llamada “eddy viscosity”.

La teoría detrás de los modelos de turbulencia pueden ser encontrados en las referencias, pero se da una descripción básica del modelo usado en este trabajo de tesis.

Modelo de dos ecuaciones: el modelo K-e

El modelo K-e desarrolla dos ecuaciones de transporte diferencial: una para la turbulencia de la energía cinética, K, y otra para el modelo de disipación turbulenta, e. el modelo k-e se basa en la expresión de Prandtl-Kolmogorov para la “eddy Viscosity”

De argumentos dimensionales, la disipación turbulenta, puede ser escrita en términos de la energía cinética de la turbulencia y la escala de longitud de turbulencia, y la “eddy viscosity” escrita en términos de k y ε :

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{L}$$

$$\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Donde C_ε y C_ν son constantes empíricas, ambas toman el valor de 0.09.

Las ecuaciones de transporte diferencial pueden ser formuladas para K y ε [], cerrando así el sistema de ecuaciones, sin tener que definir empíricamente alguna de las cantidades turbulentas.

Ya que este método directamente modela el transporte de todas las cantidades turbulentas, es el más exacto. Sin embargo, esto implica resolver dos ecuaciones diferenciales y esto incrementa el tiempo computacional.

2.3.4 VALIDACION DE CFD

La validación es la determinación de la verdadera magnitud del error cometido a través de la comparación de los resultados con datos experimentales suficientemente contrastados “BenchmarkData”. La validación que se realiza compara los perfiles de ola estándar y también los valores de la resistencia por formación de olas a través del coeficiente adimensional C_w .

Respecto a las formas del casco utilizado en esta validación, estos CFD también cuentan con resultados validados para otros cascos., estas corresponden al casco Wigley. Este casco es ampliamente utilizado como “Benchmark” en metodologías numéricas y experimentales, cuenta con resultados de diversos tipos en la literatura especializada. Como por ejemplo datos experimentales en lo que se refiere a cortes longitudinales del tren de olas y valores del coeficiente C_w . Este último dato debe tomarse con mucha reserva, pues este solo se aproxima al valor real, pero si respeta la tendencia de su variación con la variación de la velocidad.

La geometría del casco Wigley es creada a partir de la ecuación 5.20, donde L, B y D representan la eslora, manga y puntal respectivamente.

$$y = \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{2X}{L} \right)^2 \right] \times \left[1 - \left(\frac{z}{D} \right)^2 \right] \quad 2.94$$

2.3.4.1 CFD-SHIPWAVE

A continuación mostramos las dimensiones, discretización y resultados del casco Wigley. El procedimiento seguido es similar al descrito en el apéndice 1.

Lwl	1	m
B	0.10	m
T	0.0625	m
Cb	0.4624	
∇	0.002775	m ³

Tabla 2-1: Dimensiones del navío Wigley-Shipwave

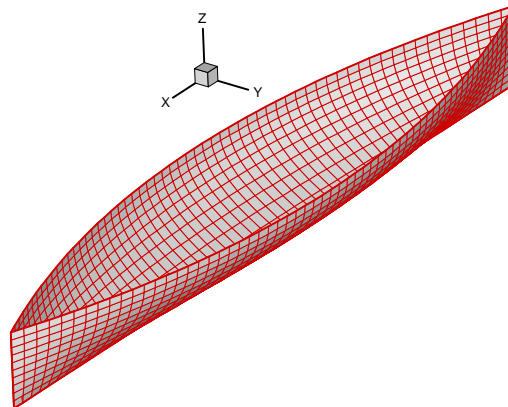


Figura 2-30: Discretización del navío Wigley

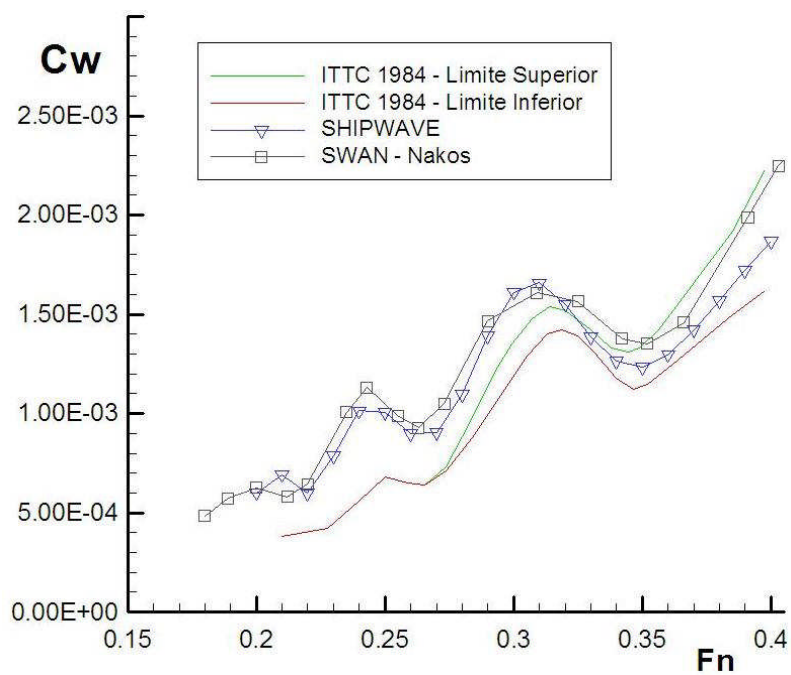


Figura 2-31: Curva de C_w vs numero de Froude

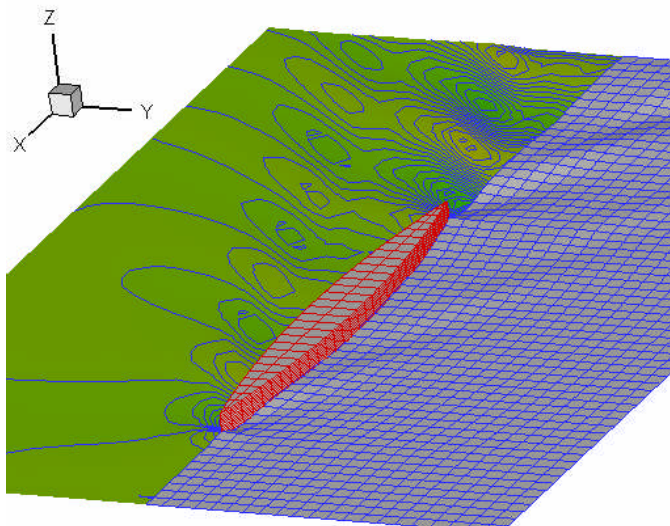


Figura 2-32: Elevación de la superficie libre del navío Wigley – $F_n=0.30$

En la figura 2.30 se puede apreciar que las crestas y valles son modeladas adecuadamente, los resultados numéricos se ajustan bien a los resultados experimentales en altos números de Froude. En bajos números de Froude existen diferencias que podrían ser atribuidas al método de cálculo de la resistencia por formación de olas. Se observa que los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** se ajustan bien con los resultados del programa **SWAN** desarrollado por Nakos & Sclavounos (1990), el cual también utiliza el método de los paneles.

Como se puede apreciar el programa Shipwave representa bien la física del problema.

2.3.4.2 CFD-TDYN

A continuación mostramos las dimensiones, discretización y resultados del casco Wigley. El análisis es realizado para un número de Froude de 0.3. El procedimiento seguido es similar al descrito en el apéndice 2.

Lwl	6	m
B	0.6	m
T	0.375	m

Tabla 2-2: Dimensiones del navío Wigley-Tdyn

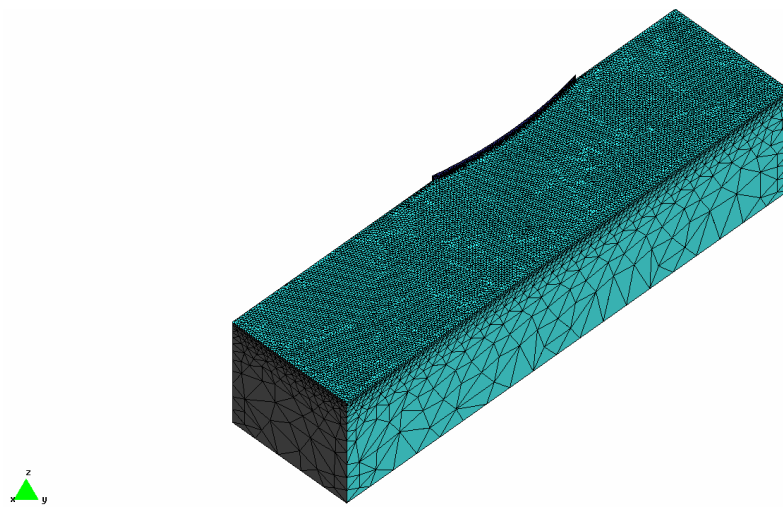


Figura 2-33: Discretización del navío Wigley y Volumen de control

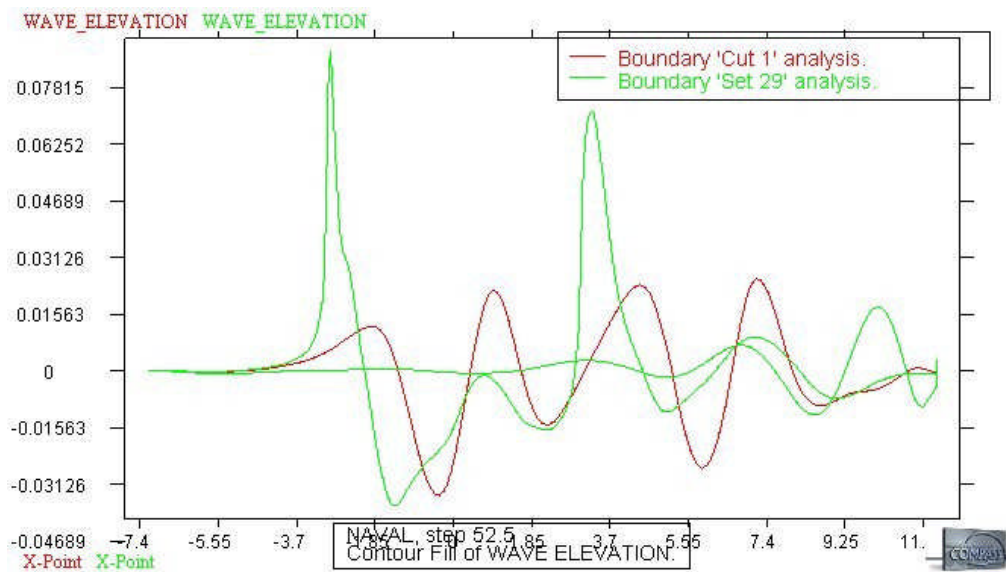


Figura 2-34: Perfil de olas

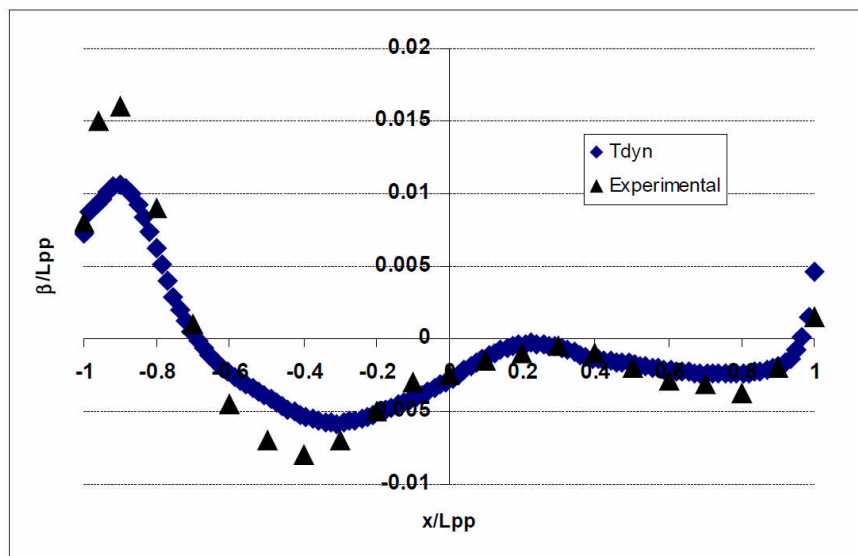


Figura 2-35: Comparación del perfil de olas obtenido mediante Tdyn con el perfil de olas obtenido mediante un ensayo experimental.

Los valores obtenidos para el Coeficiente por formación de olas y viscoso son $C_w = 1.4 \times 10^{-3}$ y $C_v = 2.9 \times 10^{-3}$ respectivamente, mientras los valores experimentales para estos mismos coeficiente son $C_w = 1.5 \times 10^{-3}$ y $C_v = 3.07 \times 10^{-3}$.

Como puede observarse en la figura 2-34 los perfiles de olas obtenidos mediante el programa Tdyn y el obtenido mediante ensayos de canal son muy similares, así como también los resultados en los que respecta a los coeficientes por formación de olas y viscoso son también similares a los obtenidos en el canal de experiencias.

De la validación de los CFD podemos concluir que tanto el programa **TDYN** al igual que el programa **SHIPWAVE** representan bien la física del problema del avance de un buque en aguas calmas.

CAPITULO 3

METODOLOGIA DEL DISEÑO DEL BULBO

Actualmente, la complejidad de la interacción hidrodinámica entre el bulbo de proa y las formas del casco, no nos permiten contar con un método completamente analítico para el diseño del bulbo de proa. Por lo que, el desarrollo de un bulbo de proa es un proceso iterativo e empírico.

Afortunadamente, el uso de herramientas estadísticas y numéricas permite al diseñador predecir el comportamiento hidrodinámico de los bulbos candidatos, dentro de un proceso de diseño de bulbos de proa, ofreciendo al diseñador la oportunidad de evaluar diferentes formas de bulbo antes de realizar una serie de costosas pruebas de modelos en Canales de Experiencia Hidrodinámica. De esta forma, un bulbo óptimo puede ser desarrollado eficientemente. Sin embargo, para iniciar este proceso iterativo de optimización de un bulbo, para una embarcación particular, es necesario desarrollar un bulbo inicial, bulbo base, que pueda ser modificado de tal manera que se mejore el rendimiento general.

3.1 DISEÑO DEL BULBO BASE

Con la finalidad de diseñar este bulbo inicial, se decidió utilizar los procedimientos dados por Kracht, Carlier y García, vistos en el capítulo 2, para la determinación de los parámetros de diseño del bulbo base. Antes de pasar a ver con detalle el diseño del bulbo base, hablaremos de la geometría del casco para la cual se está diseñando el bulbo.

3.1.1 FORMAS DEL CASCO

El Modelado del casco en 3D se realiza a partir de las líneas de forma de la embarcación. Se utiliza un programa de diseño CAD para la realización del modelado de las superficies del casco y de los bulbos a ensayar.

El procedimiento seguido para el modelado del casco es el siguiente:

- Se importa al programa CAD el plano de líneas de forma, el cual está conformado por los planos transversal, longitudinal y planta.
- Los planos son girados 90 grados convenientemente en un eje u otro, con la finalidad de orientarlos de forma que queden como en la figura 3-1.

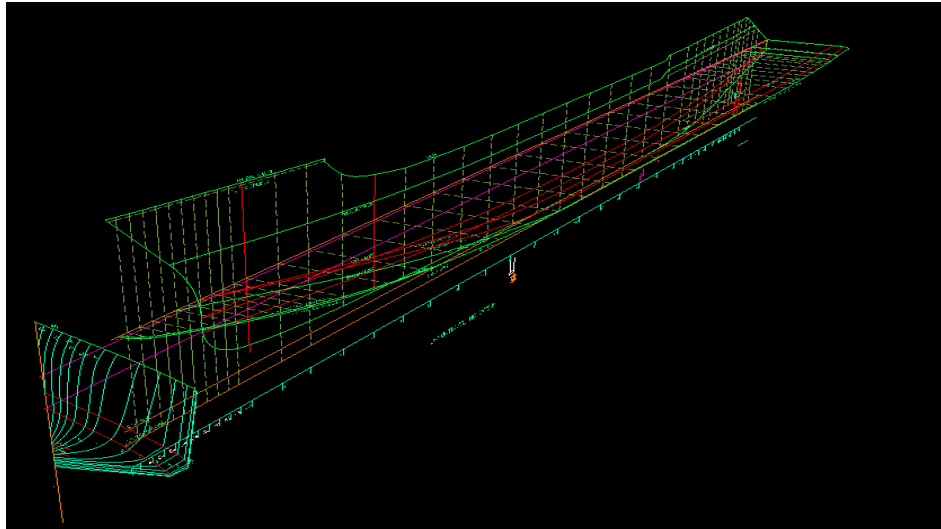


Figura 3-1: Vistas en 3D del plano de formas

- Se procede a generar las superficies del casco, la cual es generada en tres partes, para esto llevamos las cuadernas del plano transversal a la posición que les corresponde en el plano longitudinal y se cortan a la altura de la línea de flotación, quedando finalmente la geometría del casco como en la figura 3-2.

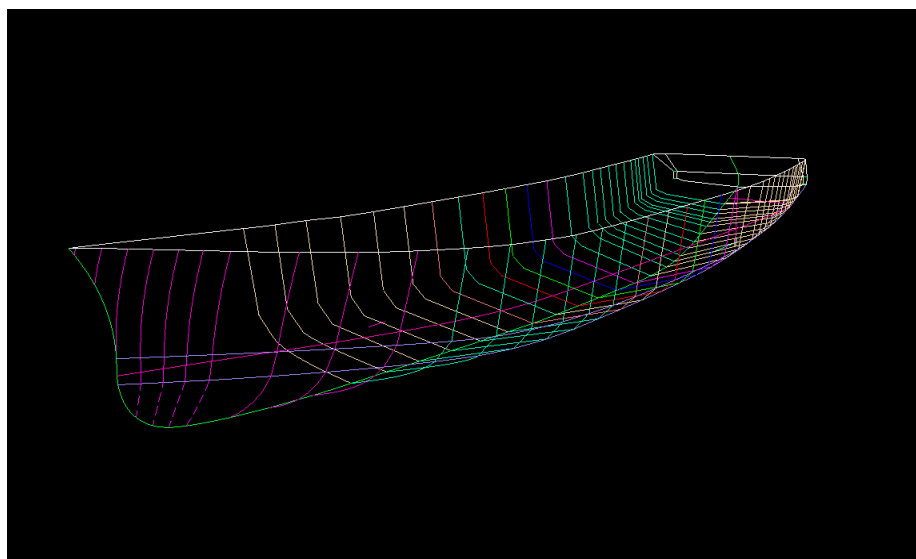


Figura 3-2: Cuadernas hasta la línea de flotación

- Se generan las superficies las cuales pueden presentar irregularidades en algunas zonas. De presentarse irregularidades estas se alisan con las herramientas de alisado del programa CAD.
- Generadas las superficies del casco, se procede a cortarlas por el calado de estudio, en este caso será el calado de salida de puerto. En la figura 3-3 se muestra, luego de los pasos anteriores, la superficie final del casco a estudiar.

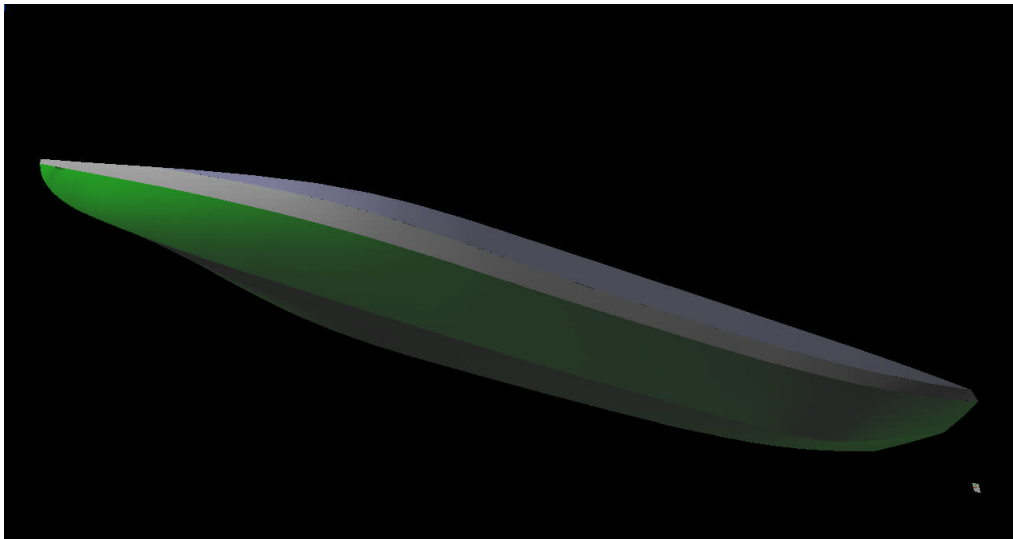


Figura 3-3: Superficie del casco a estudiar

Las formas de la embarcación (figura 3.3) posteriormente fueron modificadas con la finalidad de colocarles un bulbo de proa. Las modificaciones consistieron en diseñar diferentes bulbos de proa para la embarcación. Las dimensiones principales de la embarcación, en condición de salida de puerto, son dadas en la tabla3-1.

Todos los bulbos a diseñar, en este trabajo, serán tipo gota de agua invertida por lo siguiente:

- Estos bulbos son utilizados por todo tipo de barcos con dos condiciones de navegación claramente definidos plena carga y lastre.
- Este bulbo es fácil de instalar en cuerpos de proa con formas de V y tiene en general buen comportamiento en la mar. En condiciones donde se encuentra totalmente sumergido, su efecto de amortiguamiento es muy alto.

Por lo mencionado, líneas arriba, este tipo de bulbo se acopla perfectamente a las embarcaciones, pesqueras, las cuales tienen dos condiciones de navegación claramente definidas: salida de puerto y carga máxima y por contar con líneas de forma de proa en V.

Eslora entre perpendiculares	43.5m
Manga moldeada	8.7m
Puntal moldeado (D)	4.3m
Longitud eslora de flotación (LWL)	43.507m
Manga en la línea de flotación (B)	8.24m
Calado (T)	2.6m
Superficie Mojada	398.638m ²
Área de la sección media	16.38 m ²
Volumen	504.74m ³
Coficiente de bloque	0.56
Velocidad de servicio	12 nudos
Fn de diseño	0.3

Tabla 3-1: Dimensiones principales del buque

3.1.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO

Para la determinación de los parámetros de diseño del primer bulbo, bulbo base, se utiliza los métodos de diseño vistos en el capítulo 2.

3.1.2.1 KRACTH

Respetando las recomendaciones dadas por Kracht, vistas en el capítulo 2, para la utilización adecuada de sus cartas de diseño. Se siguió el siguiente procedimiento para la determinación a de los parámetros de diseño del bulbo.

- Con el coeficiente de bloque de la embarcación se selecciona el grupo de cartas de diseño, figuras 4-4 a 4-9, a utilizar en este caso serán las que hacen referencia a los coeficientes de bloque entorno a 0.56.
- Una vez seleccionada las carta de diseño, seleccionamos con el número de froude 0.3 los máximos factores de reducción de potencia residual que se pueden alcanzar, tomando nota de cada valor, para cada una de los 6 parámetros de diseño.

	$\Delta CPVR$
CVPR	0.315
CABT	0.325
CABL	0.34
CLPR	0.375
CBB	0.29
CZB	0.42

Tabla 3-2: Reducción de potencia residual

Se observo que podían obtenerse valores mayores de ΔC_{PVR} que las indicadas en la tabla 3-2, el inconveniente de estos valores es que se encuentran en los límites de las graficas. En dichos límites las curvas solo siguen las líneas de tendencia por lo que los valores obtenidos no son fiables de ser usados. La mayoría de valores con los que se elaboraron estas graficas se encuentran en la zona central de los diagramas.

- De los máximos factores de reducción tomamos el menor, en este caso seria 0.29, y con este valor, ingresamos nuevamente a las cartas de diseño determinando los 6 parámetros finales a utilizar

	A	B	Promedio
CVPR	0.00351	0.00386	0.00369
CABT	0.09524	0.10143	0.09833
CABL	0.099	0.11619	0.10759
CLPR	0.03385	0.03762	0.03575
CBB	0.15625	0.15625	0.15625
CZB	0.49524	0.5333	0.51427

Tabla 3-3: Parámetros de diseño

Si eligiéramos un valor superior a 0.29 para ΔC_{PVR} , podría haber parámetros del bulbo que se encuentren fuera del rango de las cartas de diseño. Por ejemplo si seleccionáramos $\Delta C_{PVR}=0.34$ el parámetro C_{BB} estaría fuera de rango.

A continuación mostramos las graficas de reducción de potencia residual que fueron utilizados para determinar los parámetros del bulbo de proa. Todas las graficas corresponden a un coeficiente de bloque de 0.56 y las curvas que se utilizaron para determinar los diversos parámetros fueron las correspondientes al número de Froude de 0.3.

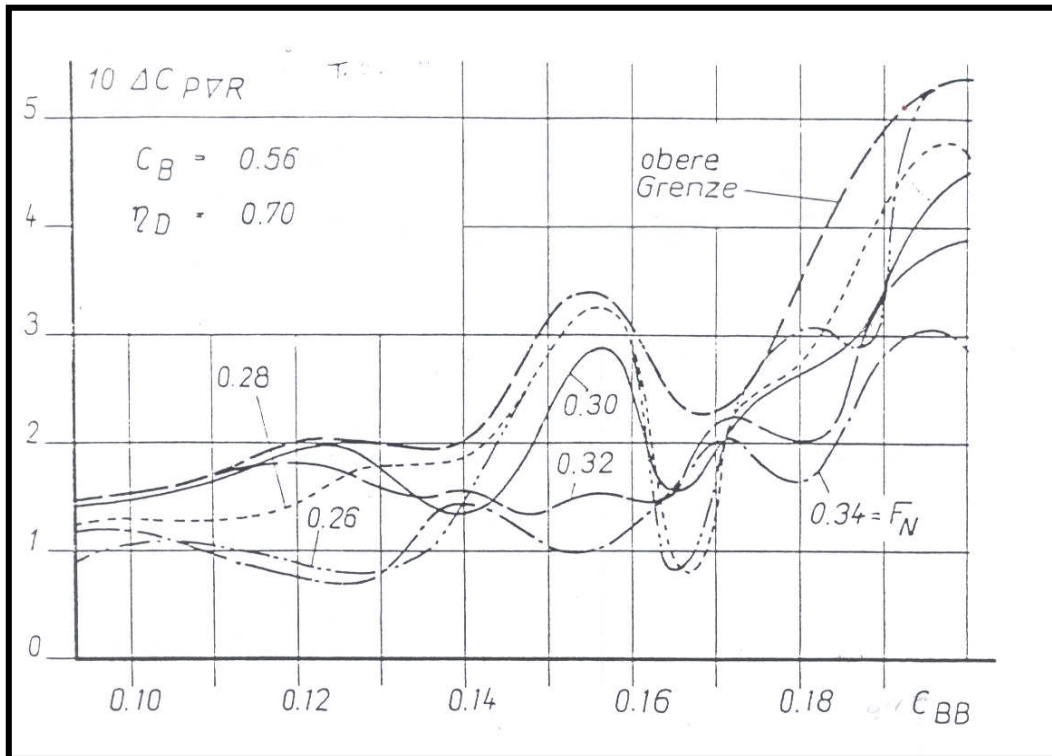


Figura 3-4: ΔC_{PVR} vs C_{BB}

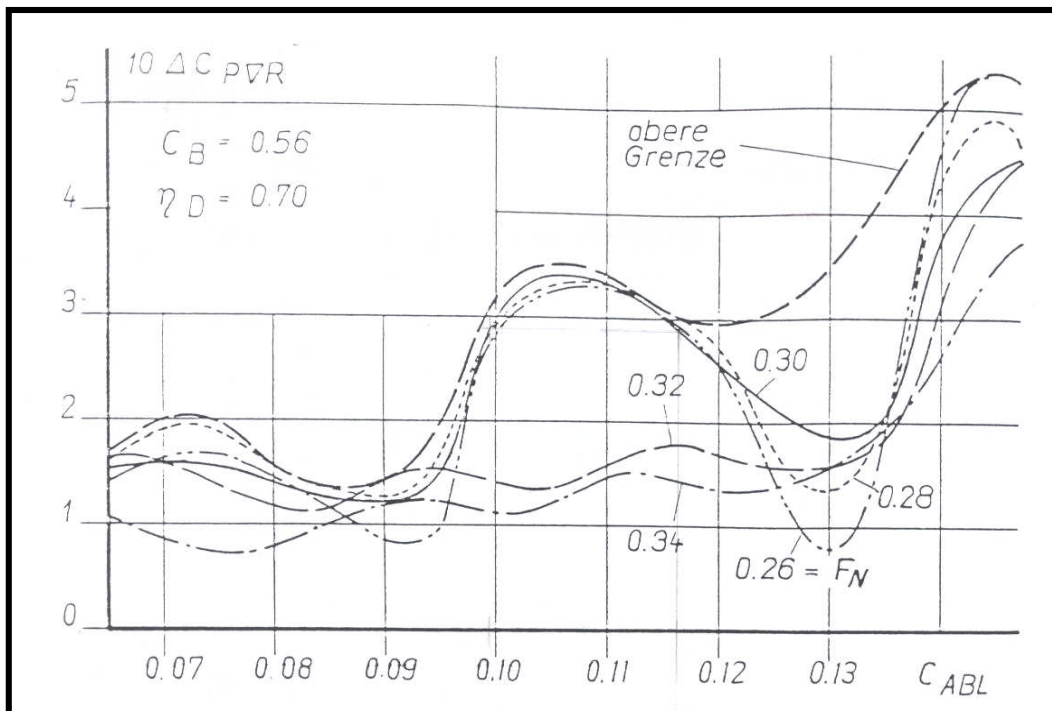


Figura 3-5: ΔC_{PVR} vs C_{ABL}

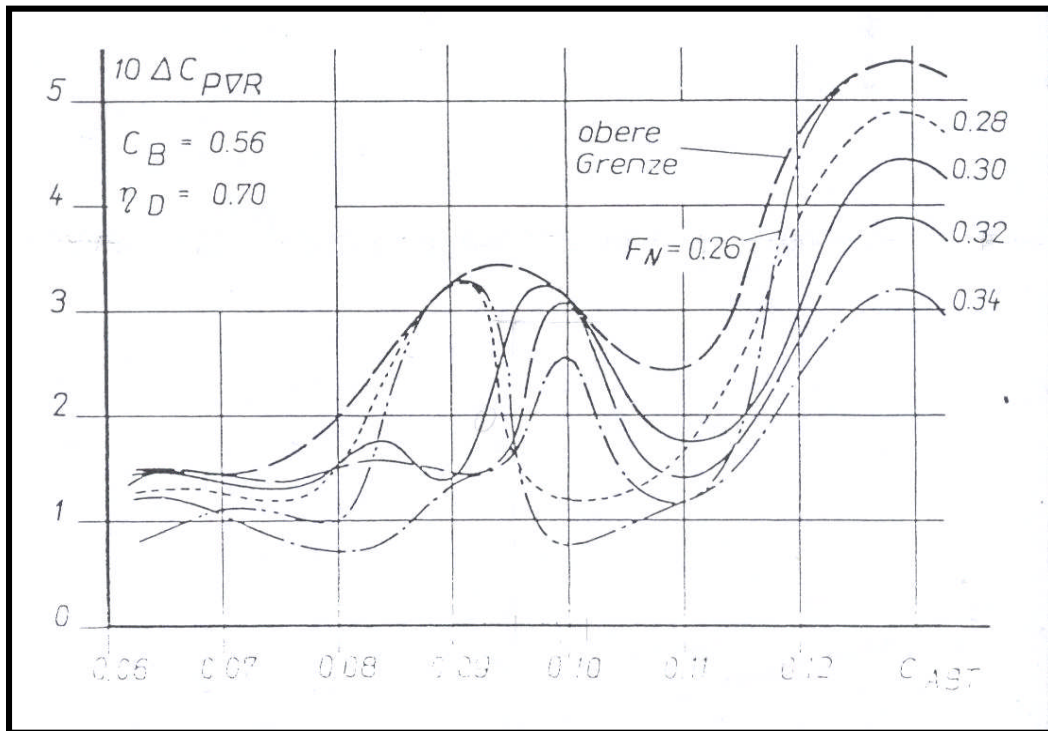


Figura 3-6: ΔC_{PVR} VS C_{LPR}

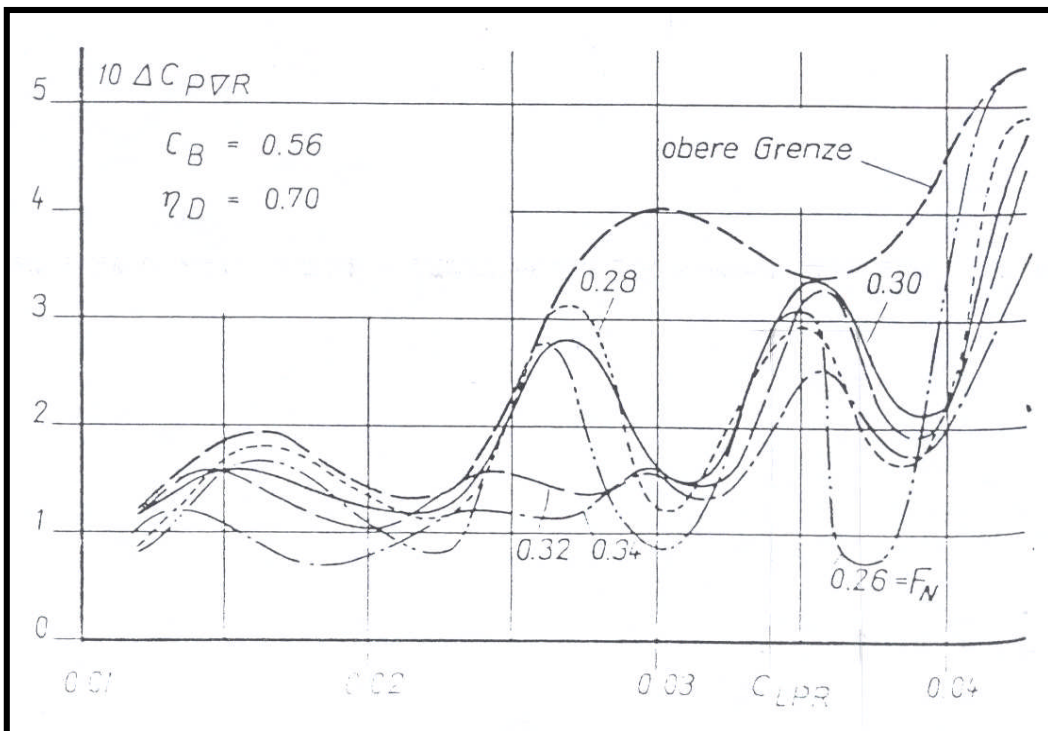


Figura 3-7: ΔC_{PVR} VS C_{ABT}

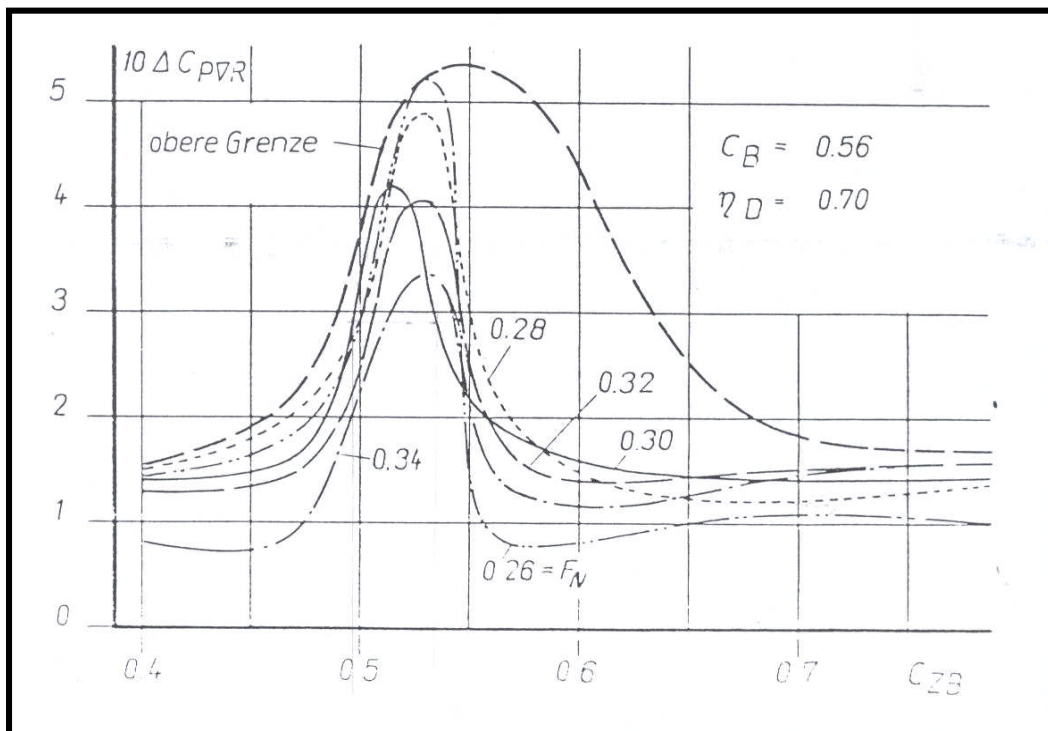


Figura 3-8: ΔC_{PVR} VS C_{ZB}

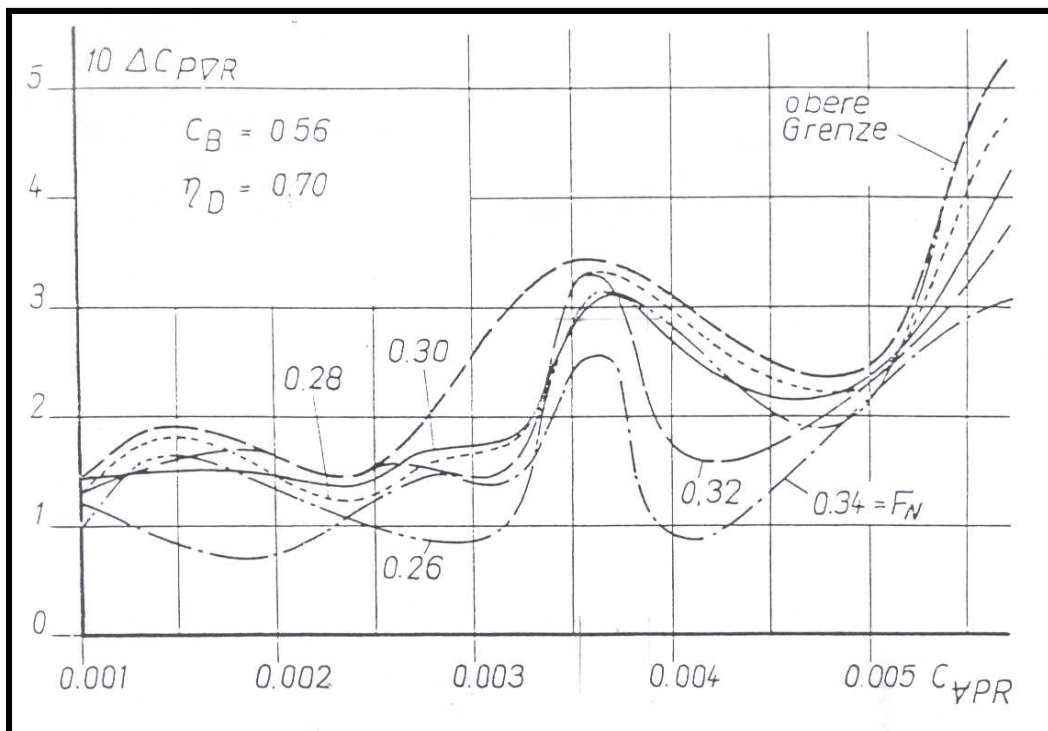


Figura 3-9: ΔC_{PVR} VS C_{VPR}

a. REDUCCIÓN DE POTENCIA RESIDUAL

El coeficiente de reducción de potencia residual es una medida del porcentaje de reducción en la potencia necesaria para mover un buque con un bulbo de proa comparado con el mismo buque sin un bulbo de proa. Este coeficiente solo considera la potencia que es necesaria para superar la resistencia residual de las formas del casco (resistencia total menos friccional) y es cuantificada mediante:

$$\Delta C_{PVR} = 1 - \frac{C_{PVR(WITOUT)}}{C_{PVR(WITHBULB)}} \quad 3.1$$

Donde:

$$C_{PVR} = \frac{P_D}{[(\rho/2)V^3(V_{WL}^2)^{0.3333}]} - \frac{C_F S}{[n_D(V_{WL}^2)^{0.3333}]} \quad 3.2$$

P_D = Potencia entregada

P = Densidad del agua de mar

V =Velocidad

V_{wl} =Volumen desplazado

C_F =Coeficiente de resistencia friccional

S = Superficie Mojada

n_D = Coeficiente cuasi-propulsivo.

Valores altos del coeficiente de resistencia residual son deseables, debido a que un mayor ΔC_{PVR} indica una mayor reducción en la resistencia residual, esto último como resultado de la adición de un bulbo de proa.

3.1.2.2 CARLIER

A continuación resumimos las consideraciones dadas por Carlier, las cuales fueron detalladas en el capítulo 3.

- Rango de aplicación del bulbo:

$$5 < L_{pp} < 6 \quad 3.3$$

$$0.55 < C_b < 0.625 \quad 3.4$$

Dentro de este rango el 65 % de los buques lleva bulbo.

- En general, el bulbo no suele ser recomendable si $C_b \times B / L_{pp} > 0.135$

En nuestro caso:

$$C_b = 0.56$$

$$C_b \times B / L_{pp} = 0.102$$

Por lo que el bulbo es aplicable para este tipo de embarcación.

Se siguieron las recomendaciones dadas por Carlier, ver capítulo 3, para determinar la altura, protuberancia y área transversal. Obteniéndose los siguientes valores:

	Carlier
Z_B	0.91-1.43
A_{BT}	1.064-1.719
L_{PR}	1.24-1.409
B	1.236-1.648
A_{BL}	-
Volumen	-

Tabla 3-4: Parámetros Carlier

3.1.2.3 GARCIA

Siguiendo el procedimiento descrito por García, ver capítulo 3, los siguientes valores fueron obtenidos:

	García
L_{PR}	0.635
A_{BT}	0.675
Z_B	1.537

Tabla 3-5: Parámetros García

3.1.3 VALORES DE DISEÑO

Con los coeficientes de diseño determinados mediante los métodos de García, Carlier y Kratch determinados los valores de las dimensiones del bulbo. Resumimos en la siguiente tabla los valores obtenidos.

	García	Carlier	Kratch
Z_B	1.537	0.91-1.43	1.38
A_{BT}	0.675	1.064-1.719	1.61
L_{PR}	0.635	1.24-1.409	1.55
B_B		1.236-1.648	1.28
A_{BL}			1.76
Volumen			1.86

Tabla 3-6: Valores de diseño

De la tabla 3-6, notamos:

- Que los valores obtenidos por el método de Kracht y Carlier se relacionan entre sí, ya que los valores obtenidos mediante el método de Kracht se encuentran dentro del rango de valores dado por Carlier.
- Que de los tres métodos vistos, el método que más información proporciona en cuanto a parámetros de diseño es el método de Kracht, seguido por el método de Carlier y García en ese orden.
- Que de los tres métodos presentados, los métodos de Kracht y Carlier son los que guardan cierta relación.

Por lo visto líneas arriba, los valores de diseño a utilizar para nuestro primer bulbo serán los dados por Kracht. Cabe mencionar que al utilizar los valores calculado mediante el método de Kracht estamos cumpliendo también con el rango de valores dados por Carlier.

3.1.4 GEOMETRIA DEL BULBO

Una vez determinado los parámetros de diseño del bulbo de proa, es necesario definir la geometría del bulbo para esto se siguió la siguiente metodología:

- Para determinar la altura del bulbo de proa en la perpendicular de proa. Cabe mencionar que tanto la determinación de esta altura y la distancia del bulbo a la línea base deben ser determinados según el criterio del diseñador. Sin embargo, la altura del bulbo es limitado por al menos dos requerimientos. El primer es que dicha altura debe ser lo suficientemente para que el área transversal del bulbo (A_{BT}) pueda ser desarrollada, y la segunda que la línea

superior del bulbo debe mantenerse a una distancia apropiada bajo la línea de flotación. Un valor tentativo para esta altura puede ser obtenida mediante la siguiente expresión:

$$H_B = \frac{4ABT}{\pi B_B} \quad 3.5$$

- El perfil longitudinal superior del bulbo desde la perpendicular de proa hasta el punto más alejado del bulbo, es decir la línea que une la parte superior del bulbo con la nariz de este, fue realizada siguiendo la forma general de una elipse con su vértice en la nariz del bulbo. Es obvio que el criterio del diseñador influye grandemente en la elección de esta curva. Por lo que, dos diseñadores utilizando exactamente los mismos parámetros del bulbo podrían desarrollar formas completamente diferentes de bulbo.
- El perfil inferior del bulbo se realizo siguiendo el perfil longitudinal superior del bulbo mediante la siguiente fórmula:

$$y(x) = \left[H_B^2 - X^2 \left(\frac{H_B}{L_{PR}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad 3.6$$

Donde:

x. representa la distancia delante de la perpendicular de proa.

y. representa la distancia bajo el perfil longitudinal superior

- Se calculo el área aproximada de algunas de las secciones transversales del bulbo, este el cálculo se realizo con la siguiente ecuación:

$$A_T = y(x)^2 \frac{A_{BT}}{H_B^2} \quad 3.7$$

Donde:

A_{BT} representa el área transversal actual del bulbo en la perpendicular de proa. En general el valor de A_{BT} es aproximadamente similar al valor dado en las cartas de diseño. Este paso nos permite definir el volumen del bulbo.

- Se calcula el área longitudinal del bulbo A_{BL} comparándose esta con el valor obtenido de la tabla de diseño. En este paso se realizan pequeños ajustes al perfil longitudinal con la finalidad de aproximarnos al valor de A_{BL} dado en la tabla de diseño, tabla 3-6.
- Se integra para determinar el volumen del bulbo.
- Con esta geometría inicial, se procede luego a realizar el alisado de las formas del bulbo. Se calculan los parámetros geométricos del bulbo y luego se comparan con los valores dados por las cartas de diseño. Aunque no es de esperarse que los valores calculados coincidan con los valores dados en las cartas de diseño, iteraciones en el diseño pueden ser realizadas con la

finalidad de que los valores calculados se acerquen a los valores dados en las cartas de diseño.

La discreción del diseñador juega un rol importante en este último paso. Después de sucesivas iteraciones la geometría final del bulbo fue producida mediante esta metodología y fue designada como Bulbo 3.1.

La inserción del bulbo en la carena del casco se realizó proyectando la sección transversal del bulbo en la perpendicular de proa hasta la intersección con el casco. Esto se hizo siguiendo las recomendaciones dadas por Hagen and Fung producto de sus varias investigaciones experimentales.

En la figura 3-10 y 3-11 podemos apreciar las geometrías de las formas de proa de la embarcación sin bulbo de proa y con bulbo de proa respectivamente.

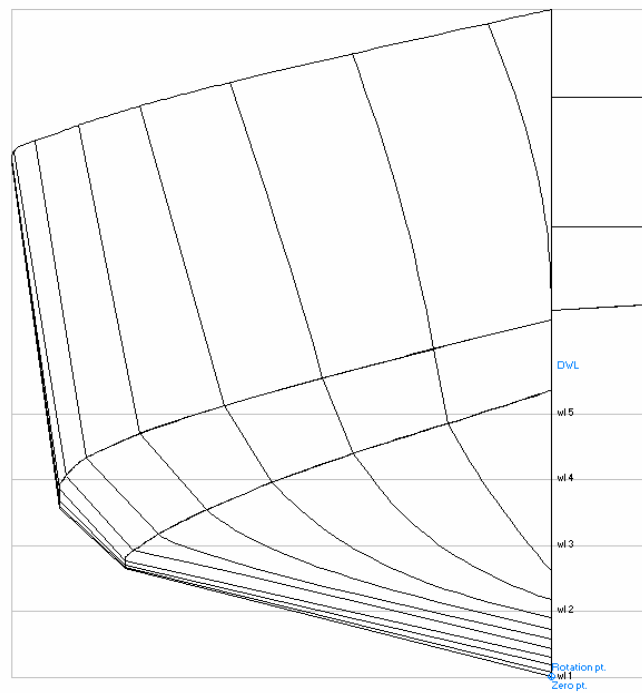
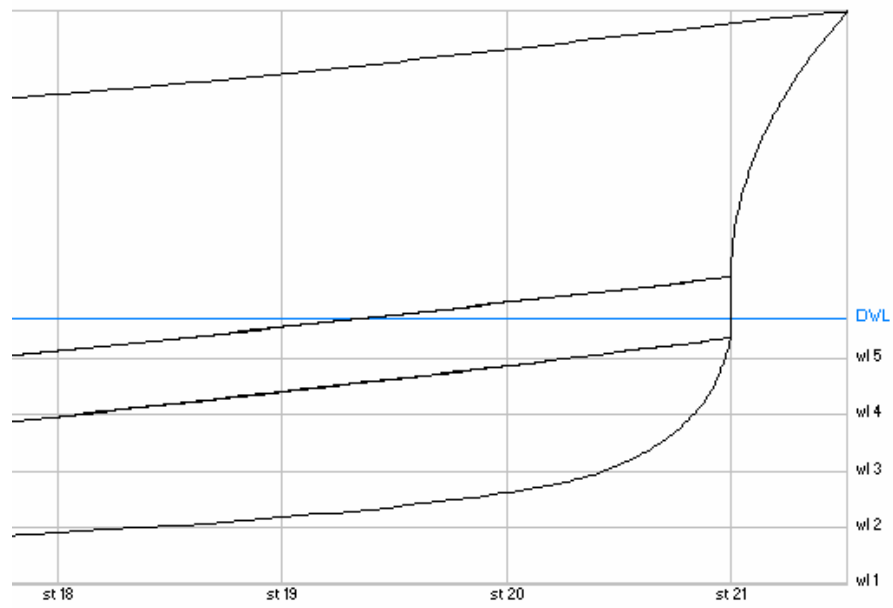


Figura 3-10: Formas originales del casco "Hull"

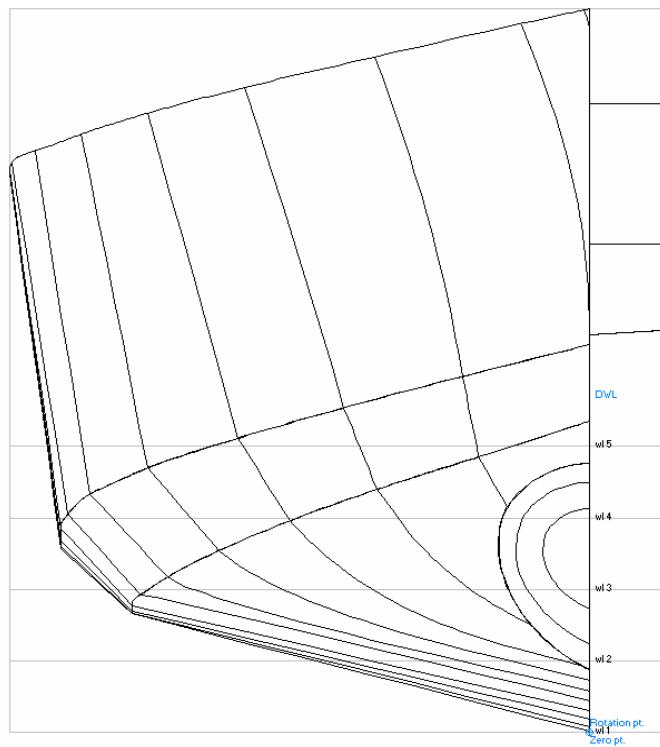
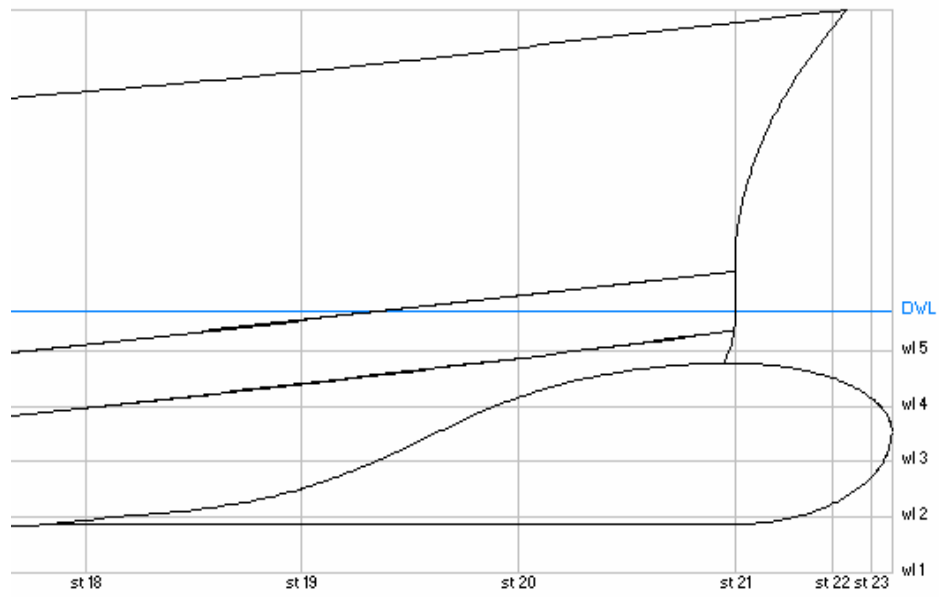


Figura 3-11: Forma con bulbo 3.1 (Bulbo base)

CAPITULO 4

OPTIMIZACION NUMERICA DEL BULBO

Diseñado el bulbo base se realiza el proceso de optimización, entendiéndose por optimización la búsqueda de una mayor reducción de la resistencia al avance, para lo cual el bulbo base es tomado como patrón para la generación de las geometrías de los nuevos bulbos. Estos nuevos bulbos son generados a partir de las variaciones sistemáticas de las formas del bulbo base, para lo cual se sigue una metodología.

4.1 VARIACIONES DE LA FORMA DEL BULBO BASE

Con el bulbo base diseñado, procedemos a generar las formas de los nuevos bulbos para esto debemos tener en cuenta que el calado de la embarcación en salida de puerto no debe variar, ver tabla 3-1. Para lograr esto se siguió la siguiente metodología:

- Se mantiene el volumen constante para todos los bulbos, pues de esta forma nos aseguramos que el calado de la embarcación se mantenga constante sea cual fuere el bulbo que se instale en el casco.

- Se generan las formas de los bulbos variando sistemáticamente las 3 dimensiones principales del bulbo base (manga, protuberancia y altura).

Los parámetros, de diseño del bulbo, a variar son los mostrados en la figura 4-1.

Donde:

- L es la protuberancia del bulbo
- $B/2$ la media-manga del bulbo
- H la altura del bulbo

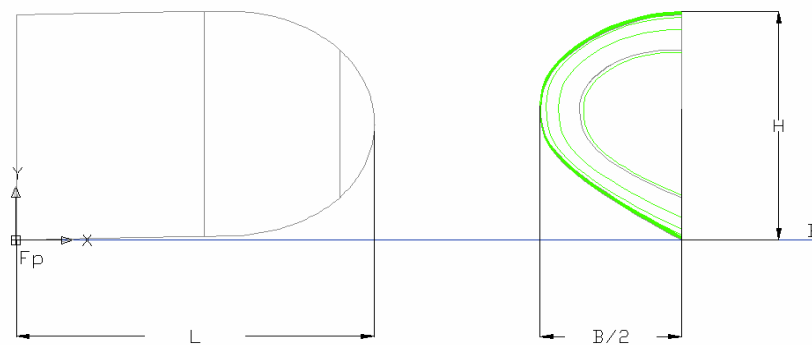


Figura 4-1: Dimensiones del Bulbo

La variación sistemática de los parámetros se hace de la siguiente forma:

- Se mantiene fijo un parámetro mientras se varían los otros dos.
- Se realizan 2 variaciones por cada parámetro fijado.

Es decir:

Por ejemplo, cuando se Fija B se varia L y H de tal forma que el volumen se mantenga constante.

CASO B fijo	X	Y
L	+ 5%	-4.76%
H	-4,76%	+5%

En las tablas 4-1 a 4-3 se muestran los porcentajes de variación que se hacen al bulbo base, el cual será denominado en adelante bulbo 3.1 .En la tabla 4-4 se muestran los parámetros de diseño de los bulbos generados. En los gráficos 4-2 a 4-7 se muestran las formas de proa del casco “Hull” con los bulbos generados.

Fijando L=1.6

caso	3.2	3.5
H	5%	-4.88%
B	-4.82%	5%

Tabla 4-1: Porcentaje de variación-Fijando L

Fijando B=1.367

caso	3.4	3.7
L	5%	-5%
H	-5.06%	5%

Tabla 4-2: Porcentaje de variación-Fijando B

Fijando H=1.6

caso	3.6	3.3
L	-5%	5%
B	5.05%	-5.05%

Tabla 4-3: Porcentaje de variación-Fijando H

Bulbo	C_{BB}	C_{LPR}	C_{ZB}	C_{ABT}	C_{ABL}	C_{VPR}
3.1	0.166	0.037	0.538	0.098	0.122	0.0034
3.2	0.158	0.037	0.553	0.101	0.123	0.0034
3.3	0.158	0.039	0.535	0.096	0.123	0.0034
3.4	0.166	0.039	0.518	0.096	0.117	0.0034
3.5	0.174	0.037	0.518	0.101	0.111	0.0034
3.6	0.174	0.035	0.538	0.103	0.117	0.0034
3.7	0.166	0.035	0.556	0.103	0.123	0.0034

Tabla 4-4: Parámetros de Bulbos

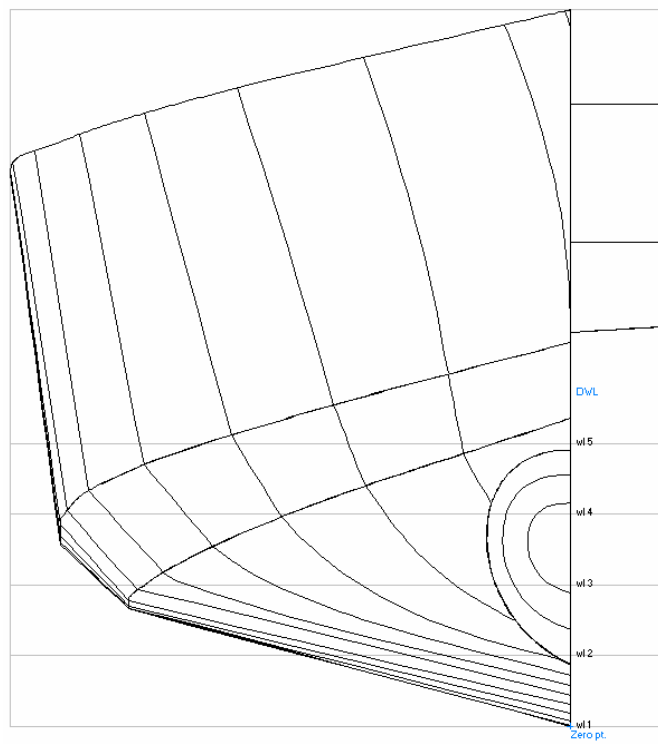
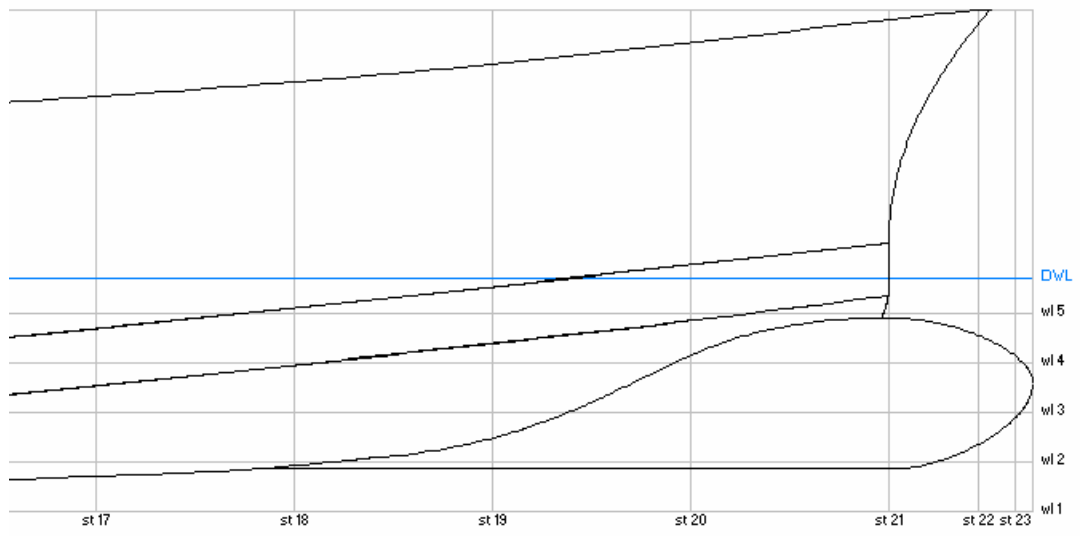


Figura 4-2: Forma con bulbo 3.2

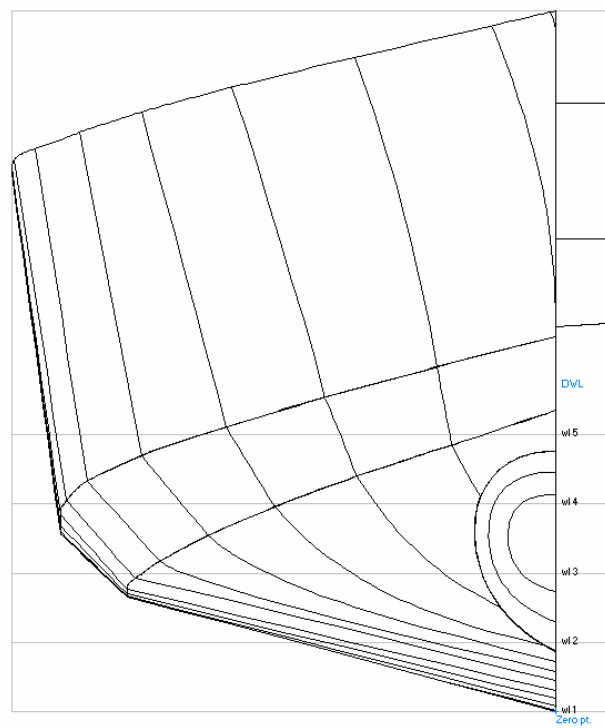
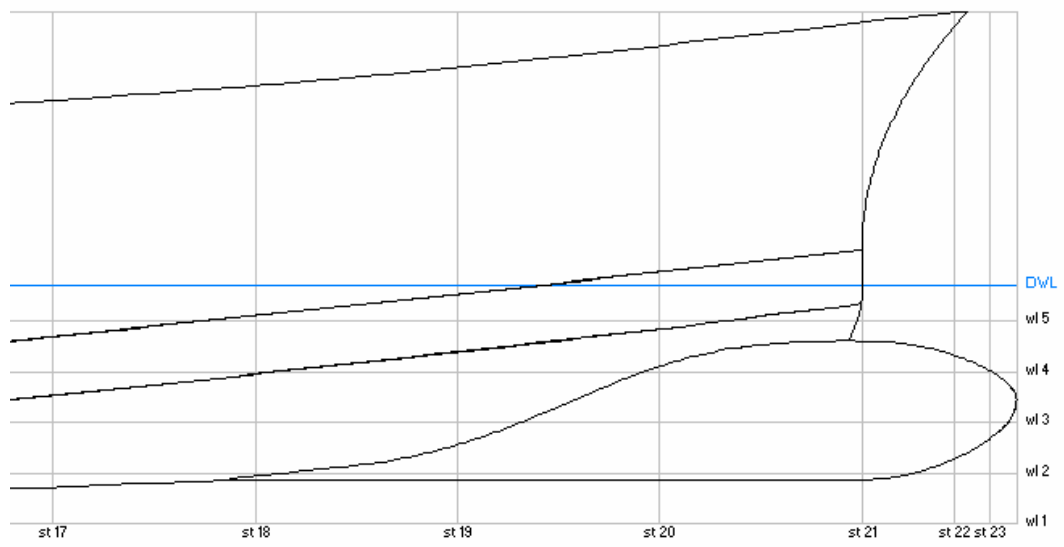


Figura 4-3: Forma con bulbo 3.3

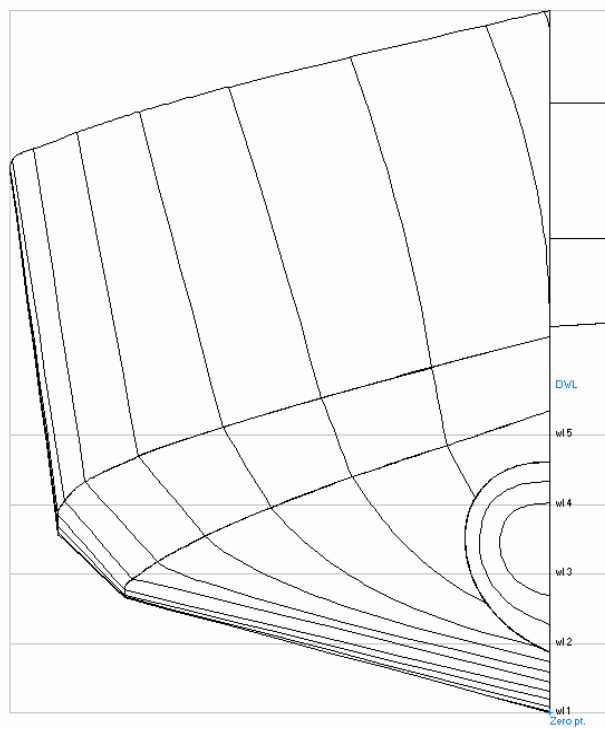
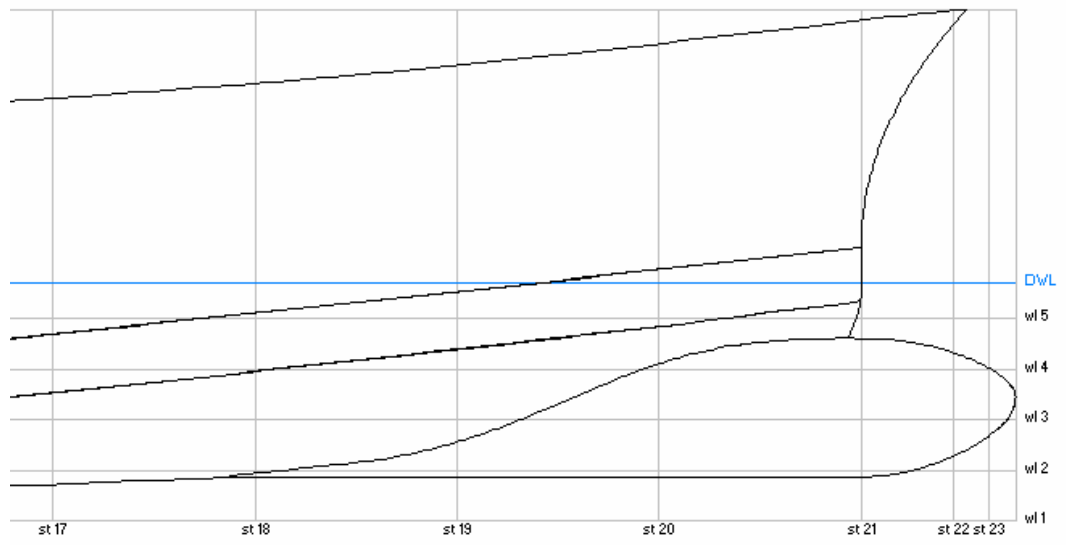


Figura 4-4: Forma con bulbo 3.4

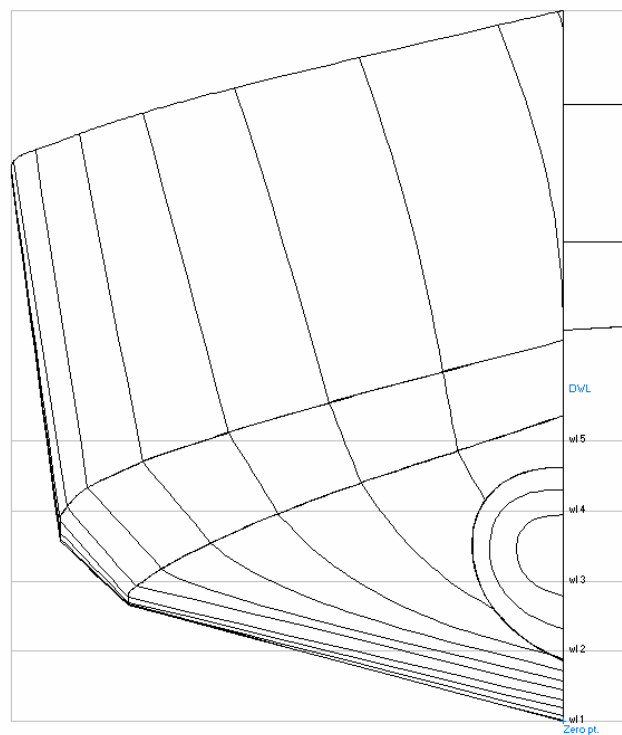
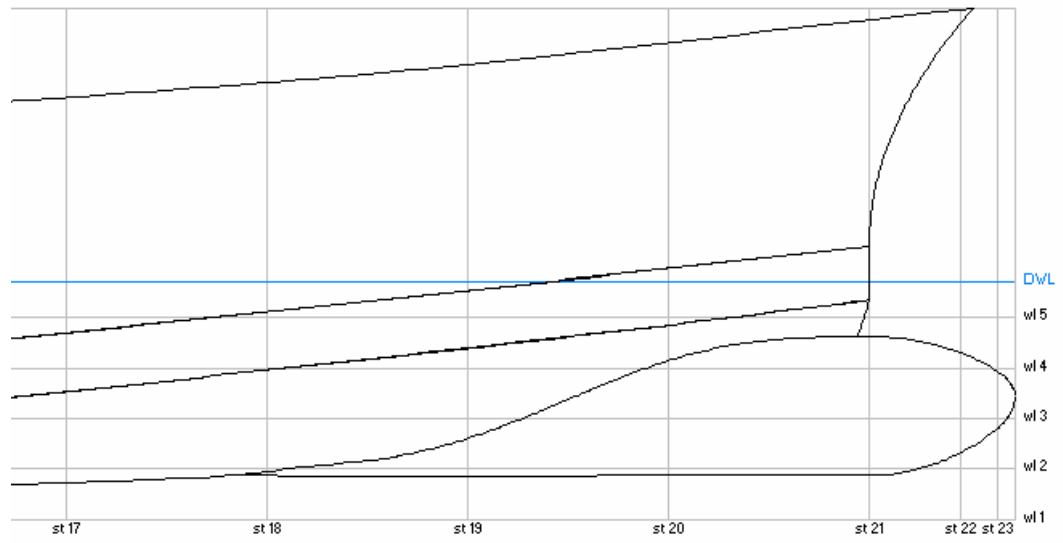


Figura 4-5: Forma con bulbo 3.5

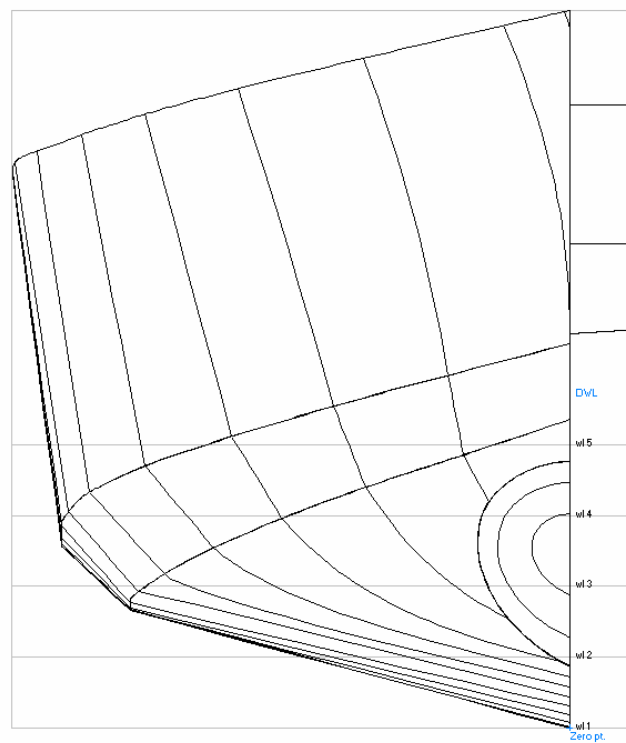
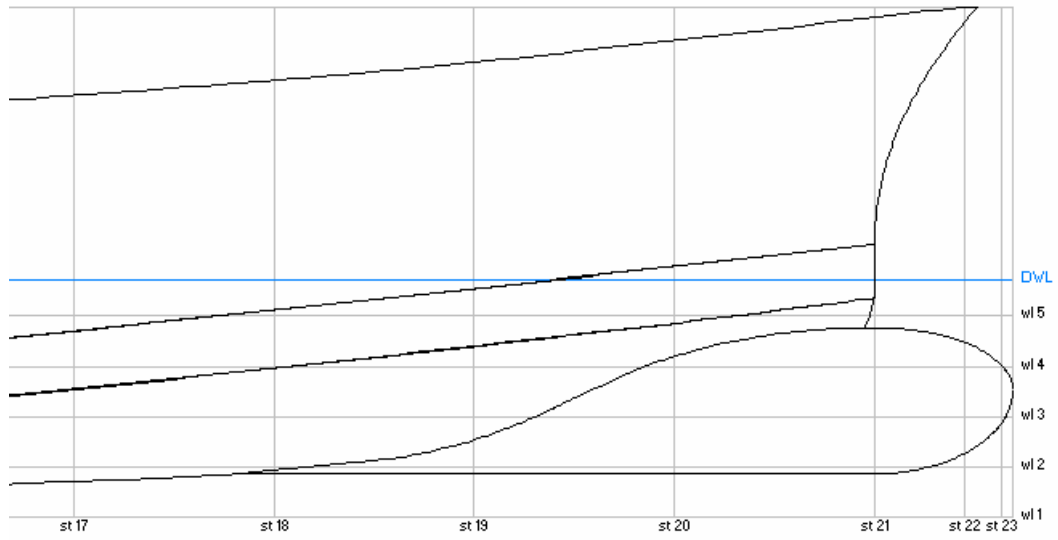


Figura 4-6: Forma con bulbo 3.6

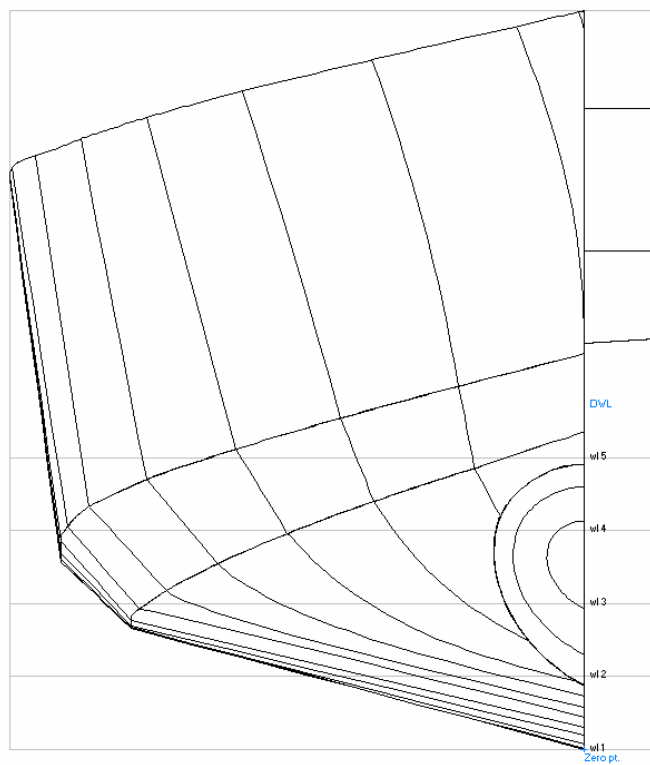
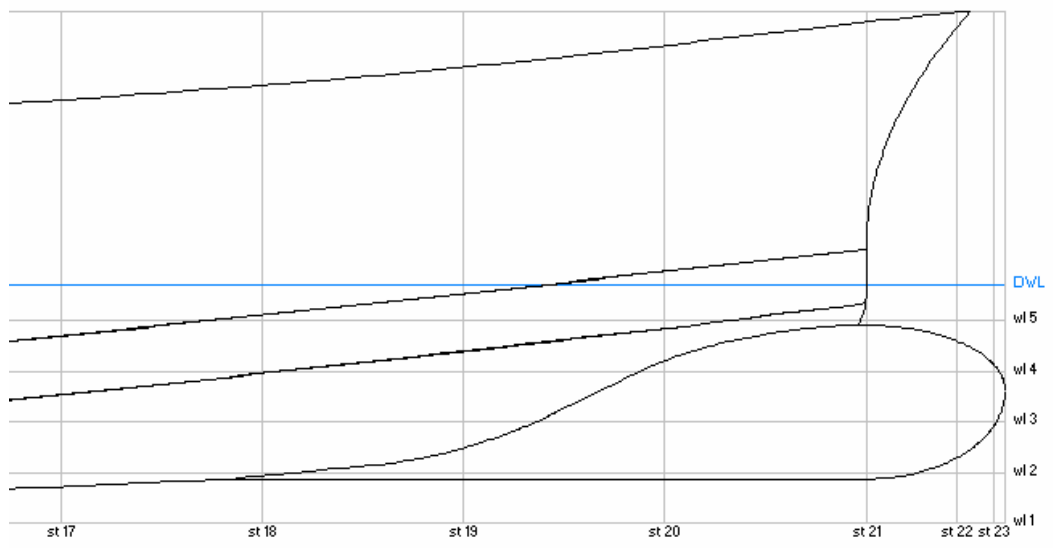


Figura 4-7: Forma con bulbo 3.7

4.2 DETERMINACION DEL BULBO ÓPTIMO

Diseñados los bulbos y vista la descripción de los CFD. Ahora se muestra el análisis seguido para la selección del bulbo óptimo a instalar en la embarcación.

4.2.1 SIMULACIONES NUMERICAS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la aplicación práctica de los CFD SHIPWAVE y TDYN a las formas de los cascos figuras 3-10, 3-11 y 4-2 a 4-7.

4.2.1.1 CFD-SHIPWAVE

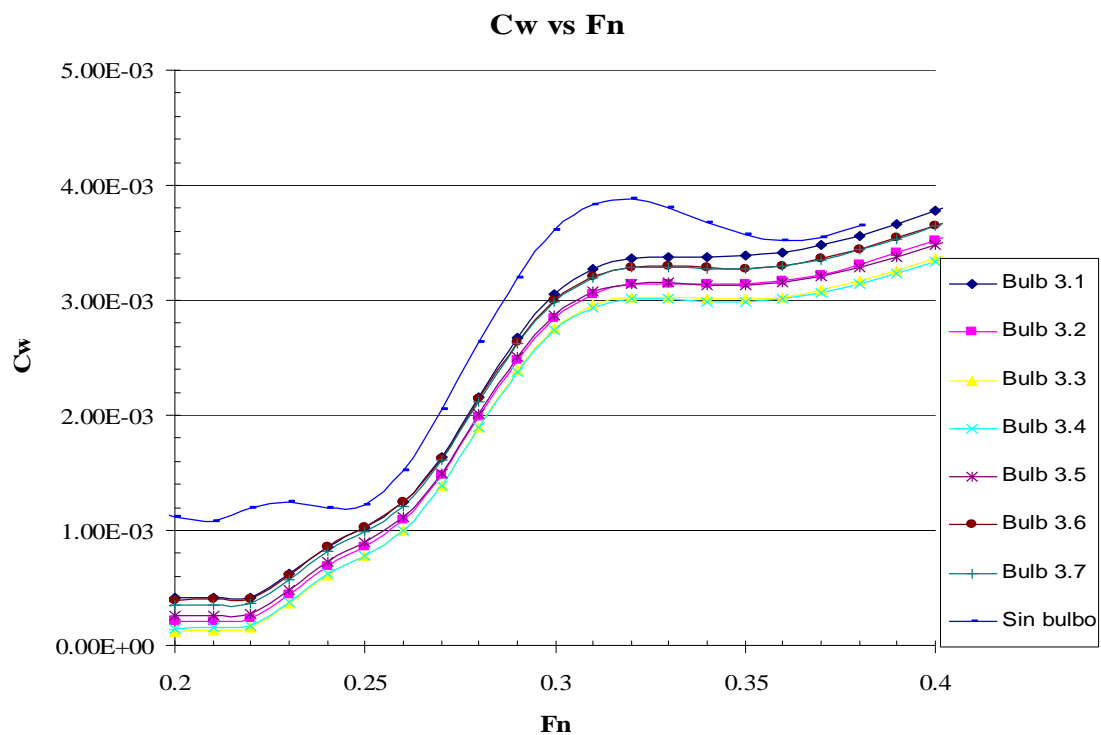


Figura 4-8: Coeficiente por formación Vs Numero de Froude

La figura 4-8 es obtenida una vez que se discretiza las superficies de la carena “Hull” (figura 3-10) y de cada una de sus variantes figuras 3-11 y 4-2 a 4-7, el procedimiento seguido para la obtención de la figura 4-8 puede ser encontrado en el apéndice. En la tabla 4-5 podemos apreciar los valores del coeficiente por formación de olas de cada uno de los bulbos proyectados así como de la embarcación sin bulbo de proa, para una gama de números de Froude que abarca desde 0.16 a 0.38.

Fn	Cw							
	sin bulbo	Bulbo 3.1	Bulbo 3.2	Bulbo 3.3	Bulbo 3.4	Bulbo 3.5	Bulbo 3.6	Bulbo 3.7
0.16	1.08E-03	4.00E-04	2.04E-04	1.05E-04	1.13E-04	2.22E-04	3.79E-04	3.42E-04
0.17	1.12E-03	3.73E-04	1.70E-04	7.26E-05	8.63E-05	2.00E-04	3.49E-04	3.11E-04
0.18	1.13E-03	4.04E-04	1.94E-04	9.81E-05	1.16E-04	2.34E-04	3.76E-04	3.40E-04
0.19	1.20E-03	3.62E-04	1.48E-04	5.74E-05	7.78E-05	1.94E-04	3.32E-04	2.94E-04
0.2	1.12E-03	4.20E-04	2.06E-04	1.17E-04	1.40E-04	2.55E-04	3.90E-04	3.52E-04
0.21	1.08E-03	4.19E-04	2.14E-04	1.31E-04	1.52E-04	2.62E-04	3.97E-04	3.57E-04
0.22	1.19E-03	4.18E-04	2.28E-04	1.50E-04	1.67E-04	2.71E-04	4.06E-04	3.64E-04
0.23	1.25E-03	6.22E-04	4.42E-04	3.65E-04	3.80E-04	4.85E-04	6.15E-04	5.75E-04
0.24	1.20E-03	8.62E-04	6.87E-04	6.07E-04	6.19E-04	7.27E-04	8.55E-04	8.17E-04
0.25	1.22E-03	1.03E-03	8.59E-04	7.78E-04	7.85E-04	8.95E-04	1.02E-03	9.89E-04
0.26	1.53E-03	1.25E-03	1.08E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.11E-03	1.24E-03	1.21E-03
0.27	2.05E-03	1.64E-03	1.47E-03	1.39E-03	1.39E-03	1.50E-03	1.63E-03	1.60E-03
0.28	2.64E-03	2.16E-03	1.99E-03	1.90E-03	1.89E-03	2.01E-03	2.14E-03	2.12E-03
0.290	3.19E-03	2.67E-03	2.48E-03	2.39E-03	2.38E-03	2.51E-03	2.63E-03	2.62E-03
0.299	3.56E-03	3.01E-03	2.81E-03	2.71E-03	2.70E-03	2.83E-03	2.96E-03	2.95E-03
0.30	3.61E-03	3.05E-03	2.85E-03	2.75E-03	2.74E-03	2.87E-03	3.00E-03	2.99E-03
0.31	3.84E-03	3.27E-03	3.06E-03	2.95E-03	2.94E-03	3.07E-03	3.21E-03	3.20E-03
0.32	3.89E-03	3.36E-03	3.14E-03	3.03E-03	3.01E-03	3.15E-03	3.29E-03	3.28E-03
0.33	3.81E-03	3.38E-03	3.15E-03	3.03E-03	3.01E-03	3.15E-03	3.29E-03	3.29E-03
0.34	3.68E-03	3.38E-03	3.14E-03	3.01E-03	2.99E-03	3.13E-03	3.28E-03	3.27E-03
0.35	3.57E-03	3.38E-03	3.14E-03	3.01E-03	2.99E-03	3.13E-03	3.28E-03	3.27E-03
0.36	3.51E-03	3.42E-03	3.17E-03	3.03E-03	3.01E-03	3.15E-03	3.30E-03	3.30E-03
0.37	3.55E-03	3.48E-03	3.23E-03	3.09E-03	3.06E-03	3.20E-03	3.36E-03	3.36E-03
0.38	3.65E-03	3.56E-03	3.31E-03	3.17E-03	3.14E-03	3.28E-03	3.44E-03	3.44E-03

Tabla 4-5: Coeficiente de formación de olas

4.2.1.2 CFD-TDYN

Los resultados de la aplicación de este Código, para la velocidad de proyecto, son mostrados en la tabla 2-4, el procedimiento seguido para la obtención de dichos resultados puede ser encontrado en el apéndice.

Casco	Sw (m²)	Cw	Cv	Ct
sin bulbo	398.638	3.701E-03	6.77E-04	4.377E-03
Bulbo 3.1	411.08	3.266E-03	6.73E-04	3.940E-03
Bulbo 3.2	410.823	3.184E-03	7.55E-04	3.938E-03
Bulbo 3.3	411.031	3.183E-03	6.63E-04	3.846E-03
Bulbo 3.4	411.378	3.182E-03	6.60E-04	3.886E-03
Bulbo 3.5	411.493	3.191E-03	7.41E-04	3.932E-03
Bulbo 3.6	411.184	3.303E-03	6.53E-04	3.956E-03
Bulbo 3.7	410.851	3.302E-03	6.70E-04	3.972E-03

Tabla 4-6: Coeficiente de formación de olas, viscoso y total

4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ahora bien, se debe tener presente que los resultados obtenidos, debido a las distintas simplificaciones realizadas en los cálculos y a los errores numéricos cometidos en la resolución del problema, son cualitativamente correctos pero cuantitativamente erróneos.

4.2.2.1 CFD-SHIPWAVE

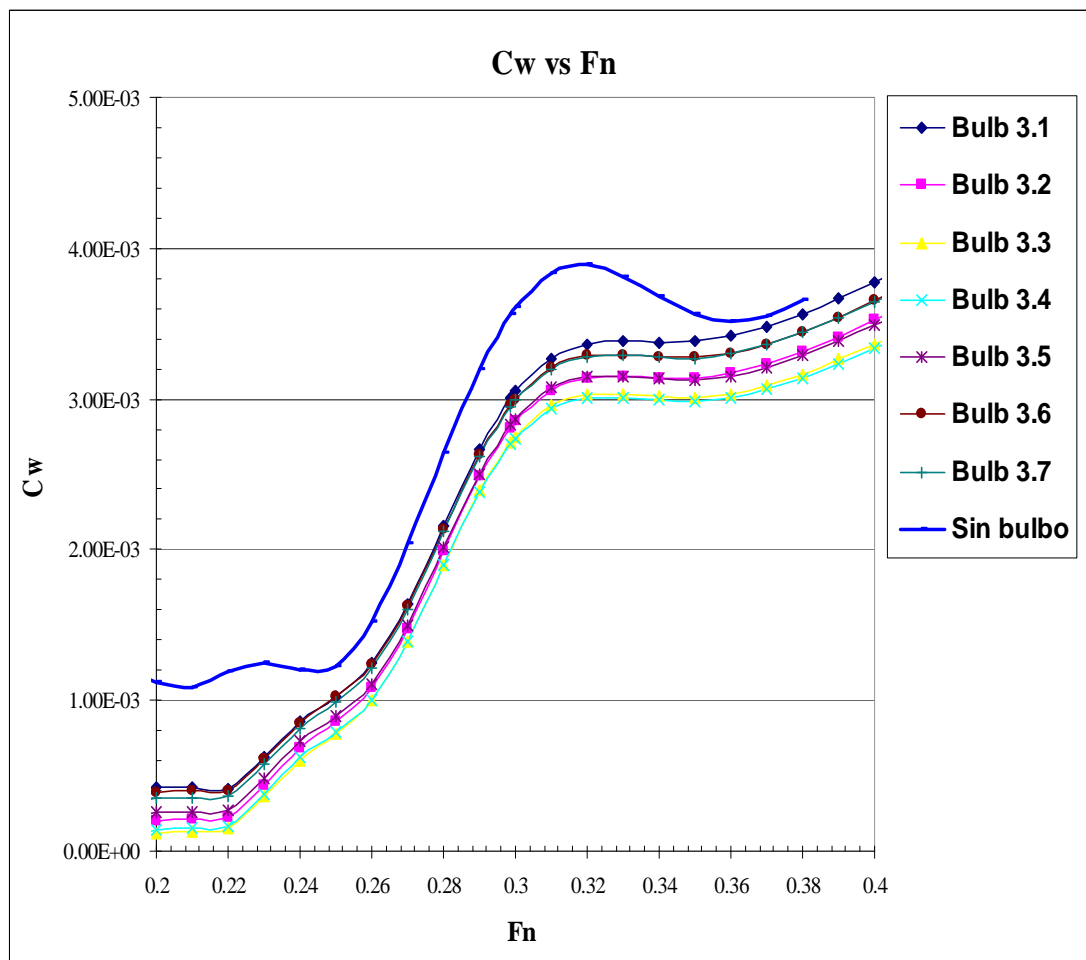


Figura 4-9: Coeficiente por formación de olas Vs Numero de Froude

En la figura 4-9 podemos observar que para el rango de números de Froude comprendido entre 0.2 y 0.4 la curva de coeficientes por formación de olas para la embarcación con los bulbos proyectados se encuentra por debajo de la curva de coeficiente por formación de olas de la embarcación sin bulbo, lo que nos indica que la resistencia por formación de olas de la embarcación es reducida al ser adosado a su casco cualquiera de los bulbos proyectados.

En adelante centraremos nuestro análisis a la velocidad de proyecto de 12 nudos, la cual corresponde a un número de Froude de 0.3.

A continuación mostramos los porcentajes de reducción de la resistencia por formación de olas. La selección de los bulbos se hizo a partir de la tabla 4-4 y los valores de C_w a partir de la tabla 4-5.

Fijo L	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.56E-03	
3.2	2.81E-03	21.10
3.5	2.83E-03	20.57

Tabla 4-7: Fijando la protuberancia

Fijo B	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.56E-03	
3.4	2.70E-03	24.15
3.7	2.95E-03	17.19

Tabla 4-8: Fijando la manga

Fijo H	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.56E-03	
3.6	2.96E-03	16.95
3.3	2.71E-03	23.80

Tabla 4-9: Fijando la altura

De estas tablas notamos lo siguiente:

- Manteniendo fija la protuberancia (L) C_w no varía significativamente.
- Manteniendo fija la manga, en este caso, para un incremento en la protuberancia del bulbo del 5 %, la resistencia disminuye en un 24 %, mientras que su reducción en un 5%, hace reducir la resistencia en un 17 %. Los porcentajes de variación de las dimensiones del bulbo pueden ser vistas en las tablas 4-1 a 4-3.
- Las variaciones de la resistencia ante el mantenimiento de la altura del bulbo siguen la misma tendencia que la variación de la resistencia con manga fija; siendo los valores de reducción de 23.8 % y 16.95% similares al caso anterior.

Hasta este punto, podemos concluir que los bulbos que más reducen el coeficiente por formación de olas son los bulbos 3.3 y 3.4

4.2.2.1.1 RESULTADOS DE RESISTENCIA EN AGUAS CALMAS

Determinado el coeficiente por formación de olas ahora es necesario calcular la resistencia por formación de olas y la resistencia viscosa para poder calcular la resistencia total al avance, en aguas calmas, de los cascos. Las siguientes líneas explican cómo es que se determinan dichas resistencias.

a. RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS

La resistencia por formación de olas se calcula a partir del coeficiente por formación de olas usando la siguiente expresión:

$$R_W = C_W(0.5\rho S V^2) \quad 4.1$$

Donde:

ρ densidad del agua de mar

V velocidad del buque

S superficie mojada del buque

b. RESISTENCIA FRICCIONAL

El coeficiente de resistencia friccional de cada variante es obtenido mediante la formulación dada por la International Towing Tank Conference (ITTC) 1957, la cual asemeja al buque a una placa plana equivalente de la mismas área y longitud que este.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad 4.2$$

En esta formulación no solo se incluye la fricción de la placa plana, si no también algunos efectos de forma y rugosidad. C_f es una función de la velocidad, longitud del buque, temperatura y viscosidad del agua.

c. RESISTENCIA VISCOSA

El coeficiente de resistencia viscosa es obtenido a partir de la relación existente entre este coeficiente y el coeficiente de resistencia friccional, los cuales se relacionan mediante un coeficiente de forma (K):

$$1 + k = \frac{C_V}{C_F} \quad 4.3$$

El coeficiente de forma k engloba todo lo que hace diferenciar al buque de la placa plana equivalente. En otras palabras la diferencia entre estos coeficientes es debido a la curvatura del casco. Esta curvatura afecta a la distribución de presión a lo largo de la longitud del buque, causando un cambio de velocidad. Para el coeficiente de forma del casco "Hull" y de cada una de sus variantes se asumió un valor de 0.1.

$$R_V = C_V(0.5\rho\rho SxV^2) \quad 4.4$$

Donde: ρ , V y S son la densidad del agua de mar, la velocidad del buque y la superficie del casco respectivamente.

d. RESISTENCIA TOTAL EN AGUAS CALMAS

Una estimación de la resistencia al avance total es obtenida agregando a la resistencia por formación de olas la resistencia viscosa:

$$R_T = R_R + R_V \quad 4.5$$

Casco	Sw (m ²)	Cw	Cf	Ct	Rt (hp)	% reducción
(Hull)	398.638	3.56E-03	1.92E-03	5.72E-03	372.72	
Bulbo 3.1	411.080	3.01E-03	1.92E-03	5.16E-03	346.92	6.93
Bulbo 3.2	410.823	2.81E-03	1.92E-03	4.96E-03	333.28	10.59
Bulbo 3.3	411.031	2.71E-03	1.92E-03	4.86E-03	326.93	12.30
Bulbo 3.4	411.378	2.70E-03	1.92E-03	4.85E-03	326.35	12.45
Bulbo 3.5	411.493	2.83E-03	1.92E-03	4.98E-03	335.08	10.10
Bulbo 3.6	411.184	2.96E-03	1.92E-03	5.11E-03	343.50	7.83
Bulbo 3.7	410.851	2.95E-03	1.92E-03	5.10E-03	342.67	8.06

Tabla 4-10: Resistencia total en aguas calmas

En la tabla 4-8 podemos observar que todas las variantes del casco con bulbo (Bulbo 3.1 a 3.7) tienen menos resistencia al avance total en aguas calmas (Rt) que la embarcación sin bulbo “Hull”

A partir de la figura 4-8 y de las ecuaciones 4-1 a 4-5 se construyen las figuras 4-9 a 4-11. Donde el coeficiente de resistencia total se determina sumando los coeficientes de resistencia por formación de olas Cw y el coeficiente de resistencia viscosa Cv. La potencia efectiva se determina mediante la siguiente expresión:

$$PE = \frac{Rt \times V}{75} \times 0.98 \quad 4.6$$

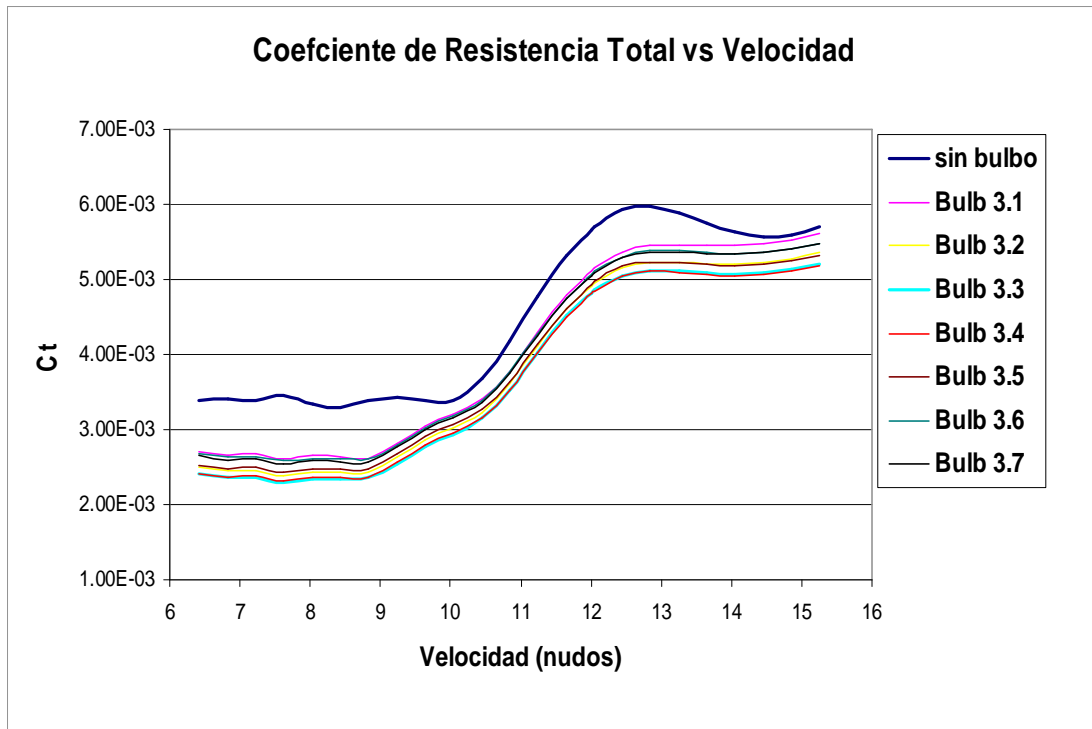


Figura 4-10: Coeficiente de resistencia total vs Velocidad

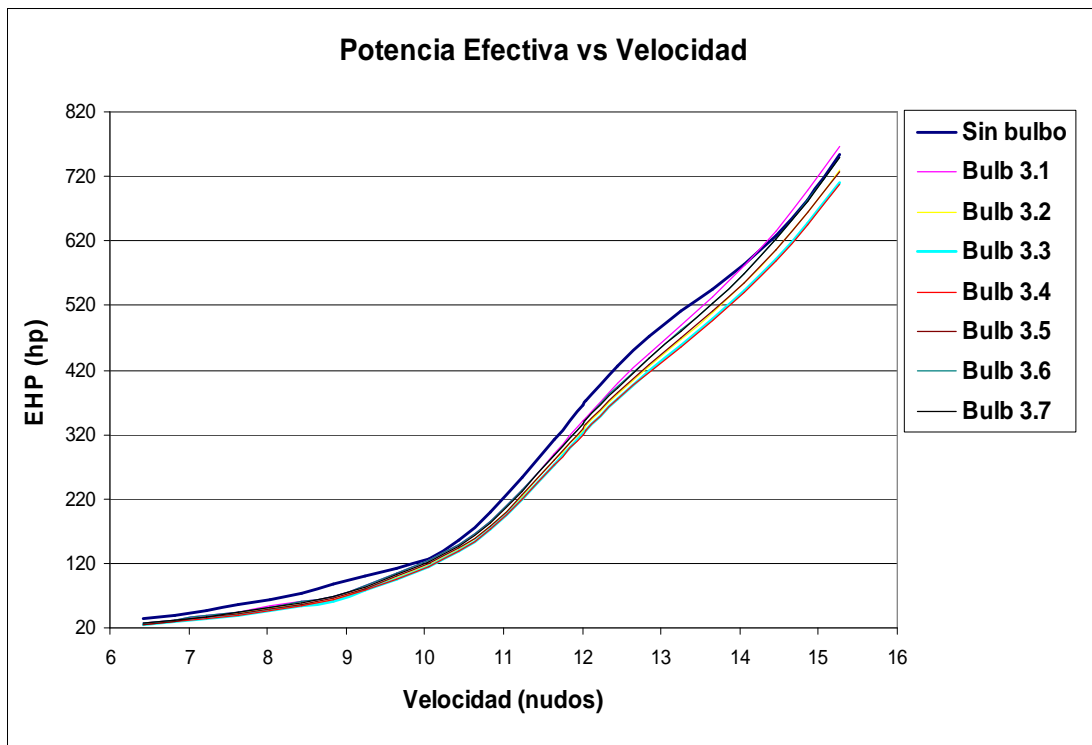


Figura 4-11: Potencia efectiva vs Velocidad

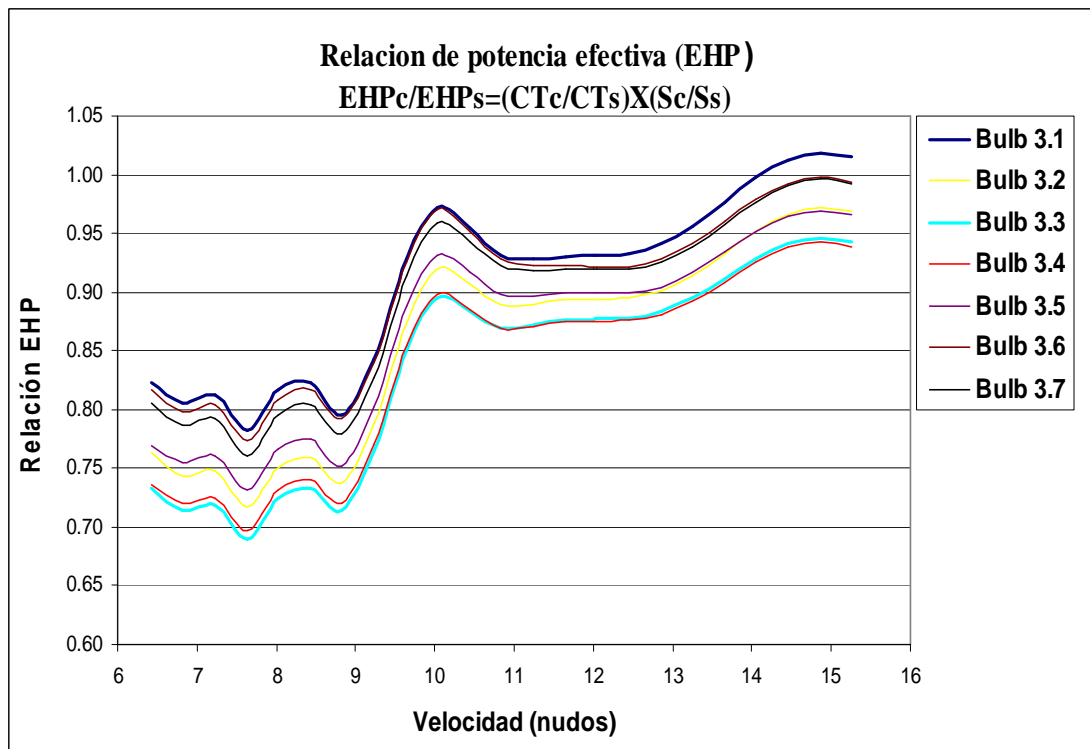


Figura 4-12: Relación de potencia vs Velocidad

En la grafica 4-11, la relación de potencia efectiva (EHP) fue definida como la potencia efectiva de la embarcación con bulbo de proa entre la potencia efectiva de la embarcación sin bulbo. Por lo que, para cualquier casco-bulbo, cualquier factor de relación menor que 1 nos indica que el bulbo esta contribuyendo en la reducción de la resistencia al avance.

En figura 4-11 se presentan los resultados de la simulación numérica en aguas tranquilas. Se observa en dichas grafica que las diferencias no son exageradas esto debido a que no se hicieron grandes variaciones a las formas del casco.

Se observa en la figura 4-11 que para las velocidades entre 10 y 13 nudos los factores de reducción más bajos los presentan los bulbos 3.3 y 3.4.

4.2.2.1.2 CONCLUSIÓN

Del análisis realizado hasta este punto y de la tabla 4-8 podemos concluir que los bulbos candidatos a ser adosados al casco son los bulbos 3.3 y 3.4 siendo los porcentajes de reducción de estos muy similares, por lo que podría tomarse como bulbo optimo a cualquiera de estos dos.

Extendiendo nuestro análisis un poco más, notamos que en la figura 4-8 las curvas de resistencia por formación de olas son muy similares para las siguientes parejas de bulbos: 3.2- 3.5, 3.3-3.4 y 3.6-3.7. Los valores de los parámetros de diseño para estos bulbos son los siguientes:

Bulbo	BB(m)	LPR(m)	ZB(m)	ABT(m²)	ABL(m²)	VPR(m³)
3.1	1.367	1.6	1.4	1.604	2	1.737
3.6	1.436	1.52	1.4	1.685	1.914	1.737
3.7	1.367	1.52	1.446	1.685	2.011	1.737
3.2	1.301	1.6	1.438	1.651	2.01	1.737
3.5	1.435	1.6	1.347	1.651	1.821	1.737
3.3	1.298	1.68	1.392	1.569	2.014	1.737
3.4	1.367	1.68	1.347	1.569	1.913	1.737

Tabla 4-11: Valores de los Parámetros de bulbo

De la figura 4-9 y de la tabla 4-11 notamos lo siguiente:

- Que si los parámetros Lpr y Abt se mantienen constantes, la resistencia por formación de olas no variara significativamente.
- Si se incrementa la longitud del bulbo y a su vez se disminuye el área transversal de este, la resistencia por formación de olas disminuye.

- Si se mantiene fija la protuberancia del bulbo la resistencia por formación de olas no varía significativamente.
- Manteniendo fija la manga del bulbo, la resistencia por formación de olas disminuye cuando se incrementa la protuberancia del bulbo y aumenta cuando se disminuye esta. Con las correspondientes variaciones de la altura del bulbo para mantener constante su volumen.
- Manteniendo la altura del área transversal del bulbo fija, la resistencia por formación de olas sigue la misma tendencia que la variación de la resistencia con manga fija.
- Se confirma la sensibilidad de la resistencia por formación de olas a pequeñas variaciones geométricas del casco sumergido.
- Para un volumen de bulbo constante, ante pequeñas variaciones en la geometría de este, la resistencia por formación de olas varía.

4.2.2.2 CFD-TDYN

Para este análisis mostraremos nuevamente la tabla 2-4

Casco	Sw (m ²)	Cw	Cv	Ct
sin bulbo	398.638	3.701E-03	6.77E-04	4.377E-03
Bulbo 3.1	411.08	3.266E-03	6.73E-04	3.940E-03
Bulbo 3.2	410.823	3.184E-03	7.55E-04	3.938E-03
Bulbo 3.3	411.031	3.183E-03	6.63E-04	3.846E-03
Bulbo 3.4	411.378	3.182E-03	6.60E-04	3.886E-03
Bulbo 3.5	411.493	3.191E-03	7.41E-04	3.932E-03
Bulbo 3.6	411.184	3.303E-03	6.53E-04	3.956E-03
Bulbo 3.7	410.851	3.302E-03	6.70E-04	3.972E-03

Tabla 4-12: Coeficiente de formación de olas, viscosa y total

En esta tabla podemos notar que todos los coeficientes por formación de olas de los cascos con bulbos son inferiores al casco de la embarcación sin bulbo. Esto nos indica que la resistencia por formación de olas del casco sin bulbo es reducida, al ser adosado a este un bulbo de proa. Similar comportamiento es encontrado en el coeficiente de resistencia total el cual es obtenido a partir de una expresión similar a la 4.5 con la única diferencia de que las resistencias son reemplazadas por los coeficientes.

A continuación mostramos los porcentajes de reducción de la resistencia por formación de olas. La selección de los bulbos se hizo a partir de la tabla 4-4 y los valores de C_w a partir de la tabla 4-12.

Fijo L	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.701E-03	
3.2	3.184E-03	13.97
3.5	3.191E-03	13.77

Tabla 4-13: Fijando la protuberancia

Fijo B	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.701E-03	
3.4	3.182E-03	14.00
3.7	3.302E-03	10.78

Tabla 4-14: Fijando la manga

Fijo H	C_w	% reducción CW
sin bulbo	3.701E-03	
3.6	3.303E-03	10.75
3.3	3.302E-03	13.98

Tabla 4-15: Fijando la altura

De estas tablas notamos lo siguiente:

- Manteniendo fija la protuberancia (L) C_w no varía significativamente.
- Manteniendo fija la manga, en este caso, para un incremento en la protuberancia del bulbo del 5 %, la resistencia disminuye en un 14 %, mientras que su reducción en un 5%, hace reducir la resistencia en un 10.78 %. Los porcentajes de variación de las dimensiones del bulbo pueden ser vistas en las tablas 4-1 a 4-3

- Las variaciones de la resistencia ante el mantenimiento de la altura del bulbo siguen la misma tendencia que la variación de la resistencia con manga fija; siendo los valores de reducción de 13.98 % y 10.75% respectivamente.

Del análisis del coeficiente por formación de olas, podemos concluir que los bulbos que más reducen la resistencia por formación de olas son los bulbos 3.3 y 3.4.

4.2.1.2.1 RESULTADOS DE RESISTENCIA EN AGUAS CALMAS

Al considera este código en sus cálculos la viscosidad no es necesario, como en el caso del código potencial SHIPWAVE, agregarle a la resistencia por formación de olas la resistencia viscosa.

Casco	Sw (m²)	Cw	Cv	Ct	Rt (Hp)	% reducción
sin bulbo (Hull)	398.638	3.701E-03	6.77E-04	4.377E-03	281.979	
Bulbo 3.1	411.08	3.266E-03	6.73E-04	3.940E-03	261.706	7.190
Bulbo 3.2	410.823	3.184E-03	7.55E-04	3.938E-03	261.465	7.275
Bulbo 3.3	411.031	3.183E-03	6.63E-04	3.846E-03	255.469	9.401
Bulbo 3.4	411.378	3.182E-03	6.60E-04	3.886E-03	258.323	9.408
Bulbo 3.5	411.493	3.191E-03	7.41E-04	3.932E-03	261.491	7.266
Bulbo 3.6	411.184	3.303E-03	6.53E-04	3.956E-03	262.856	6.782
Bulbo 3.7	410.851	3.302E-03	6.70E-04	3.972E-03	263.678	6.490

Tabla 4-16: Resistencia total en aguas calmas

En esta tabla podemos observar que todas las variantes del casco con bulbo tienen menos resistencia al avance (R_t) que la embarcación sin bulbo “Hull”. De esta tabla concluimos que los bulbos que más reducen la resistencia al avance son los bulbos 3.3 y 3.4.

4.2.1.2.2 CONCLUSIÓN

Los bulbos candidatos a ser adosados al casco son los bulbos 3.3 y 3.4 siendo los porcentajes de reducción de estos muy similares, por lo que podría tomarse como bulbo óptimo a cualquiera de estos dos.

A continuación mostramos resultados adicionales del bulbo 3.3 y del casco “Hull” obtenidas con este código.

CASCO HULL

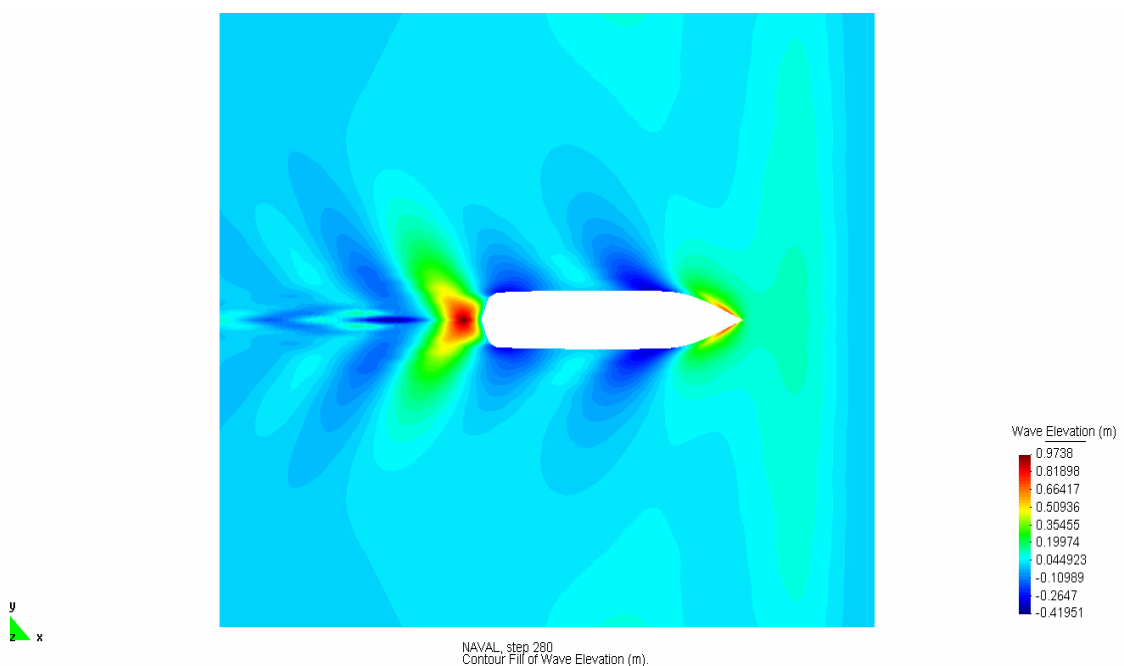


Figura 4-13: Elevación de olas- casco “Hull”

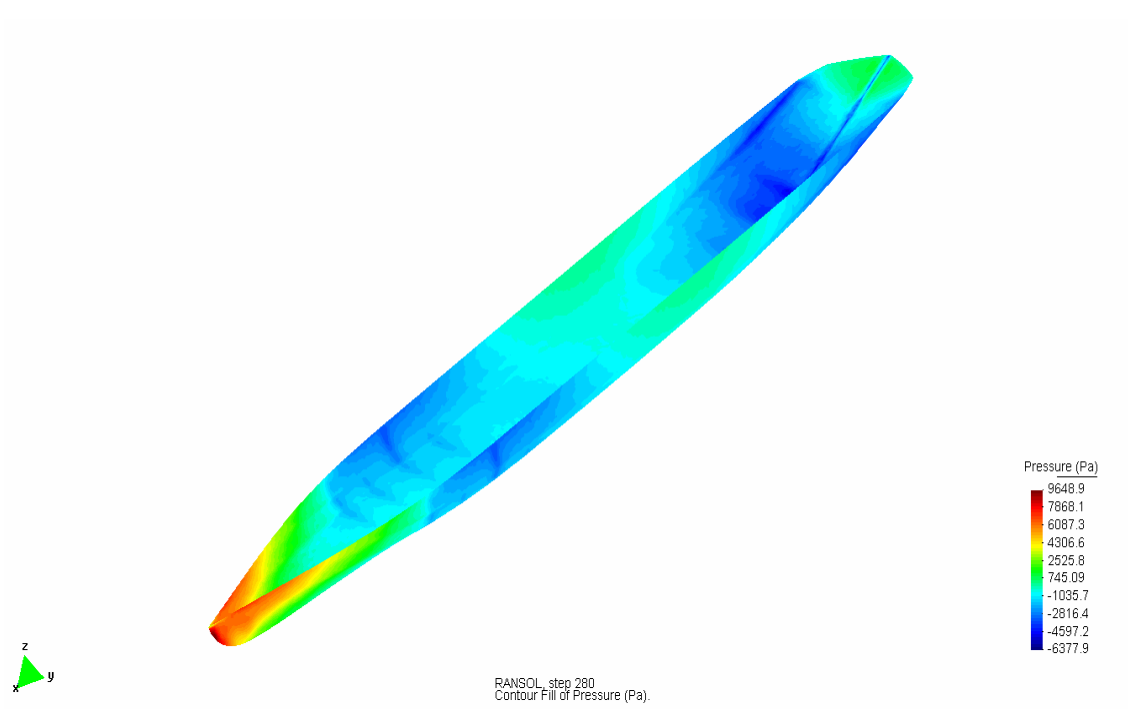
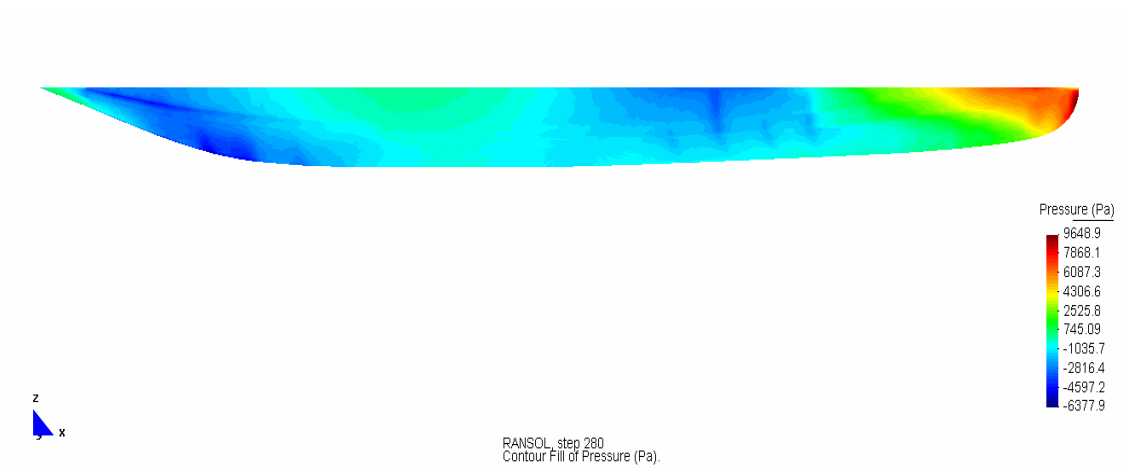


Figura 4-14: Distribución de presiones casco “Hull”

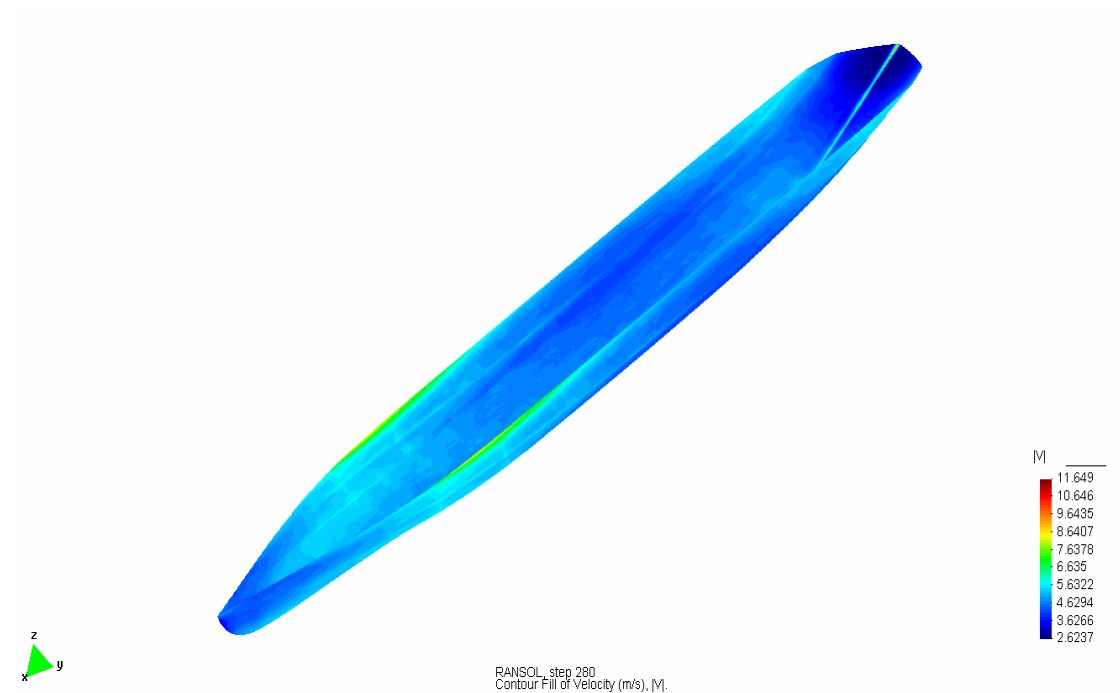
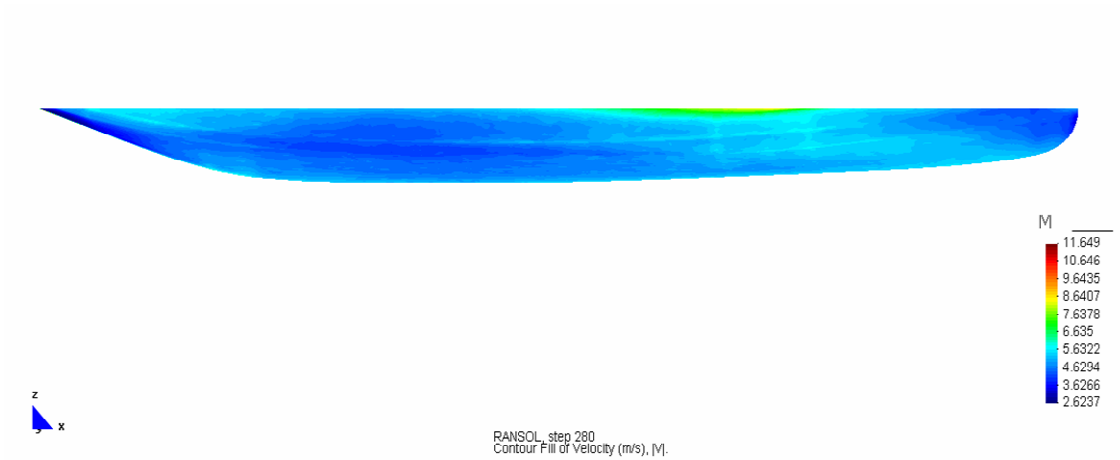


Figura 4-15: Distribución de velocidades casco “Hull”

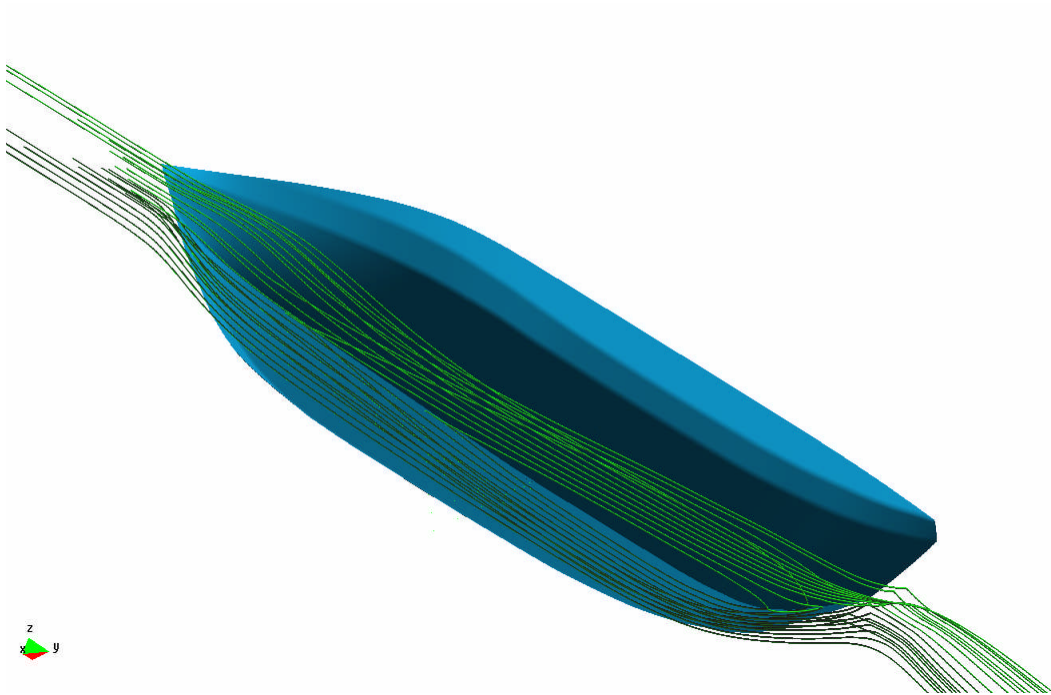
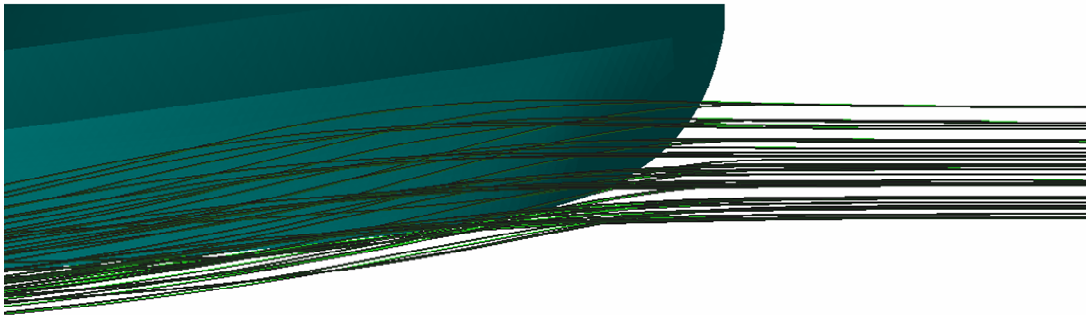


Figura 4-16: Líneas de corriente casco “Hull”

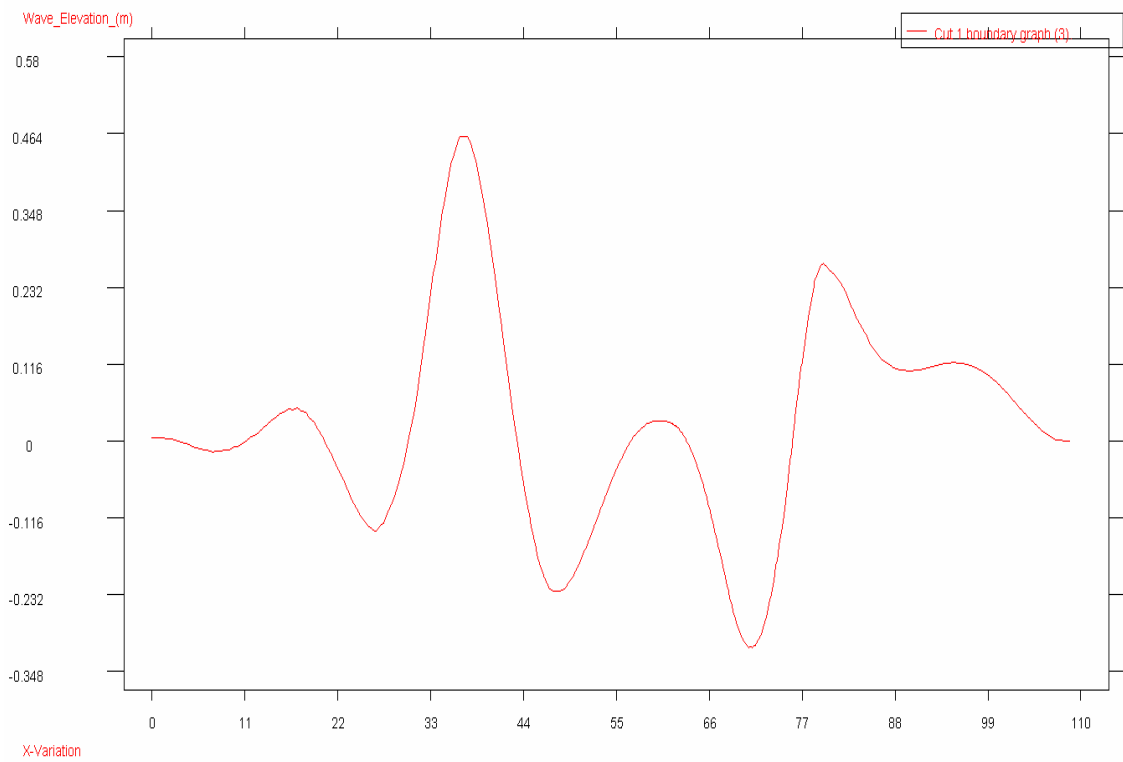
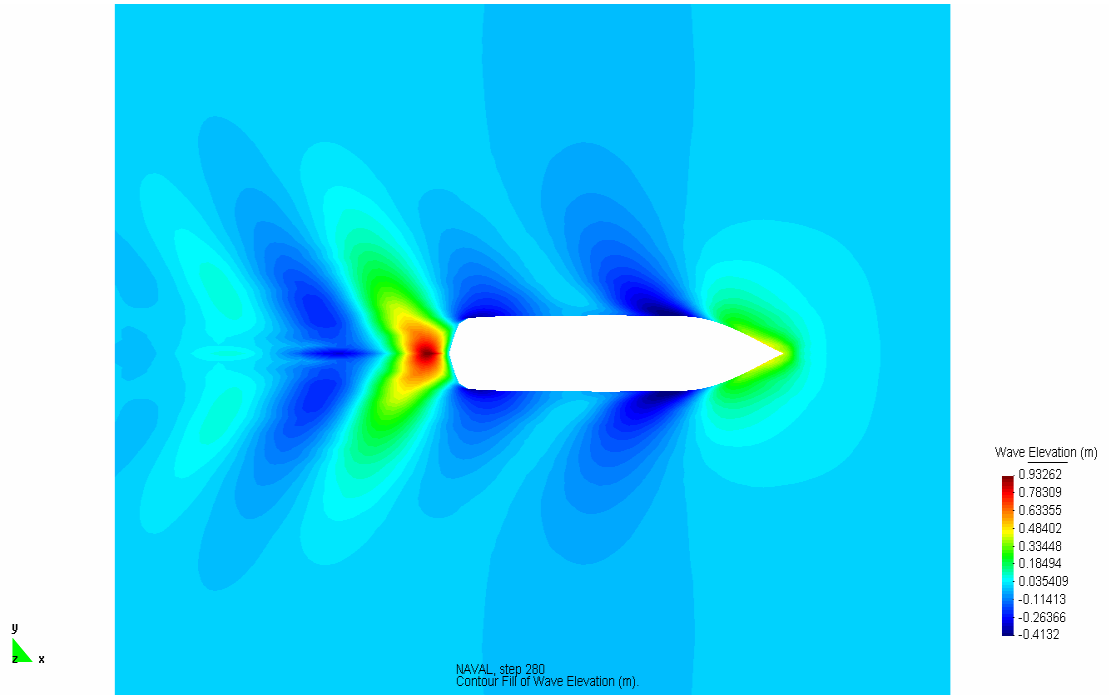


Figura 4-17: Corte de olas a 0.5665 B “Hull”

CASCO CON BULBO 3.3**Figura 4-18:** Elevación de olas Casco-Bulbo 3.3

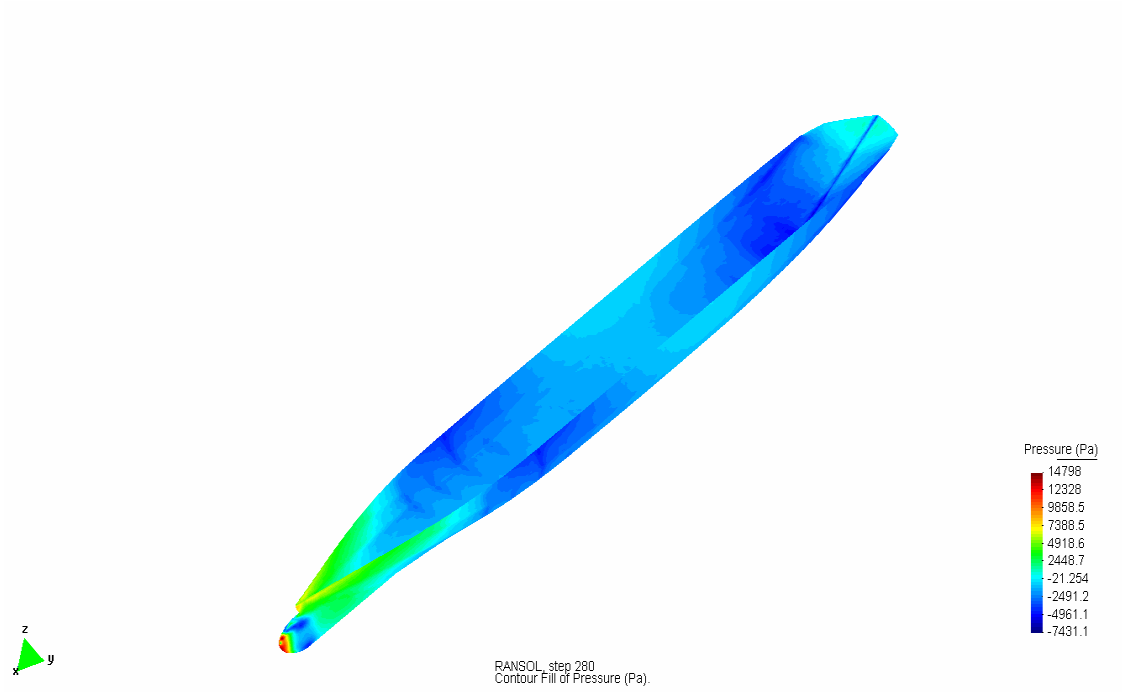
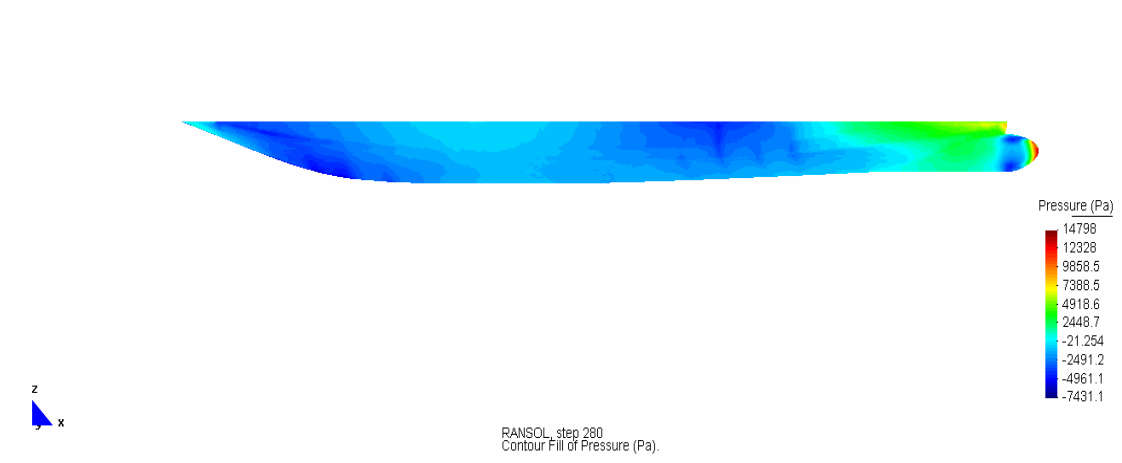


Figura 4-19: Distribución de presiones Casco-Bulbo 3.3

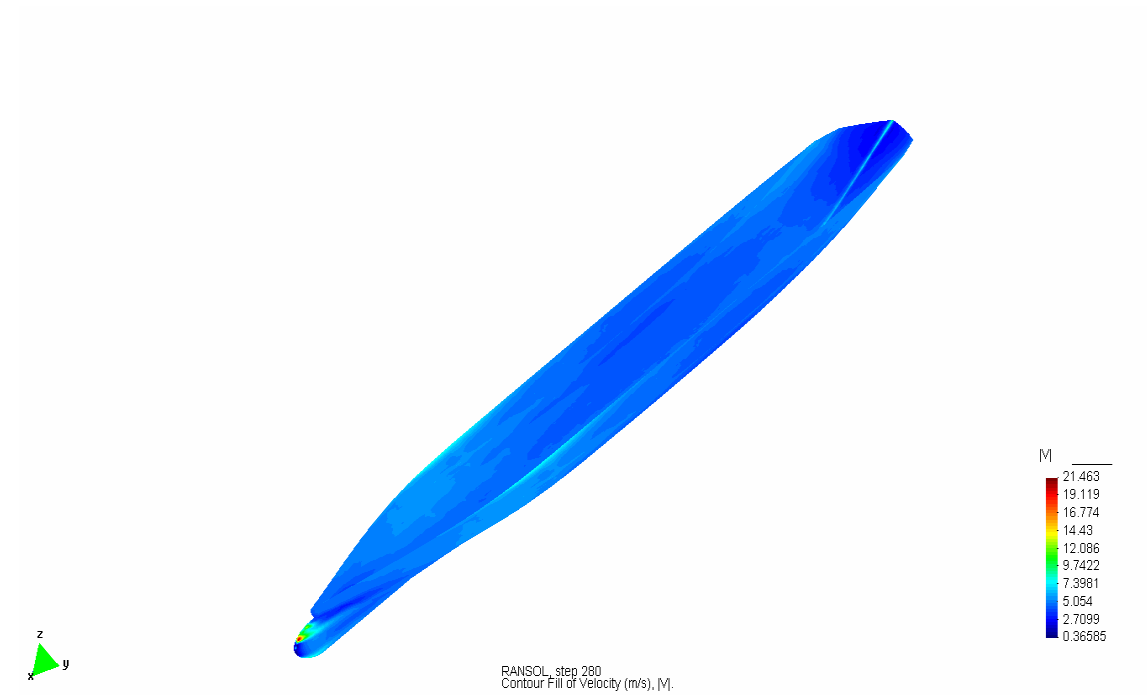
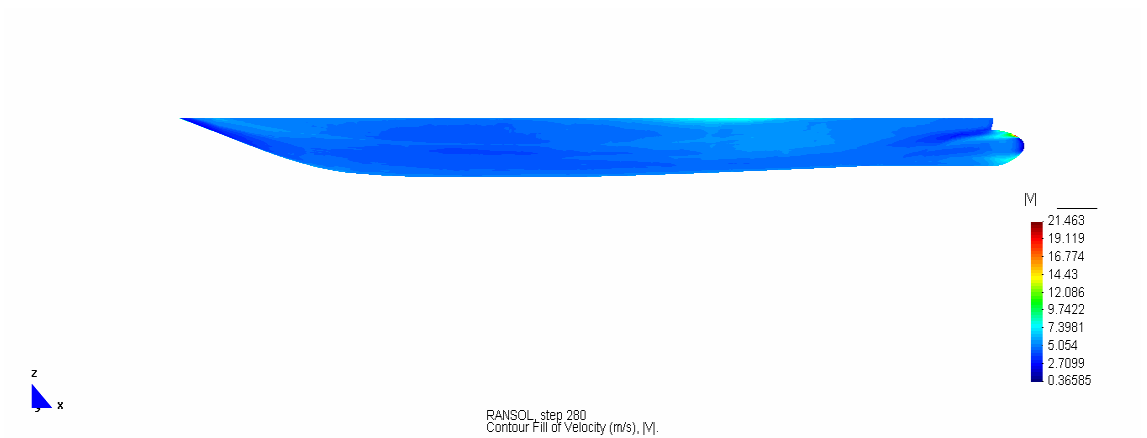


Figura 4-20: Distribución de velocidades Casco-Bulbo 3.3

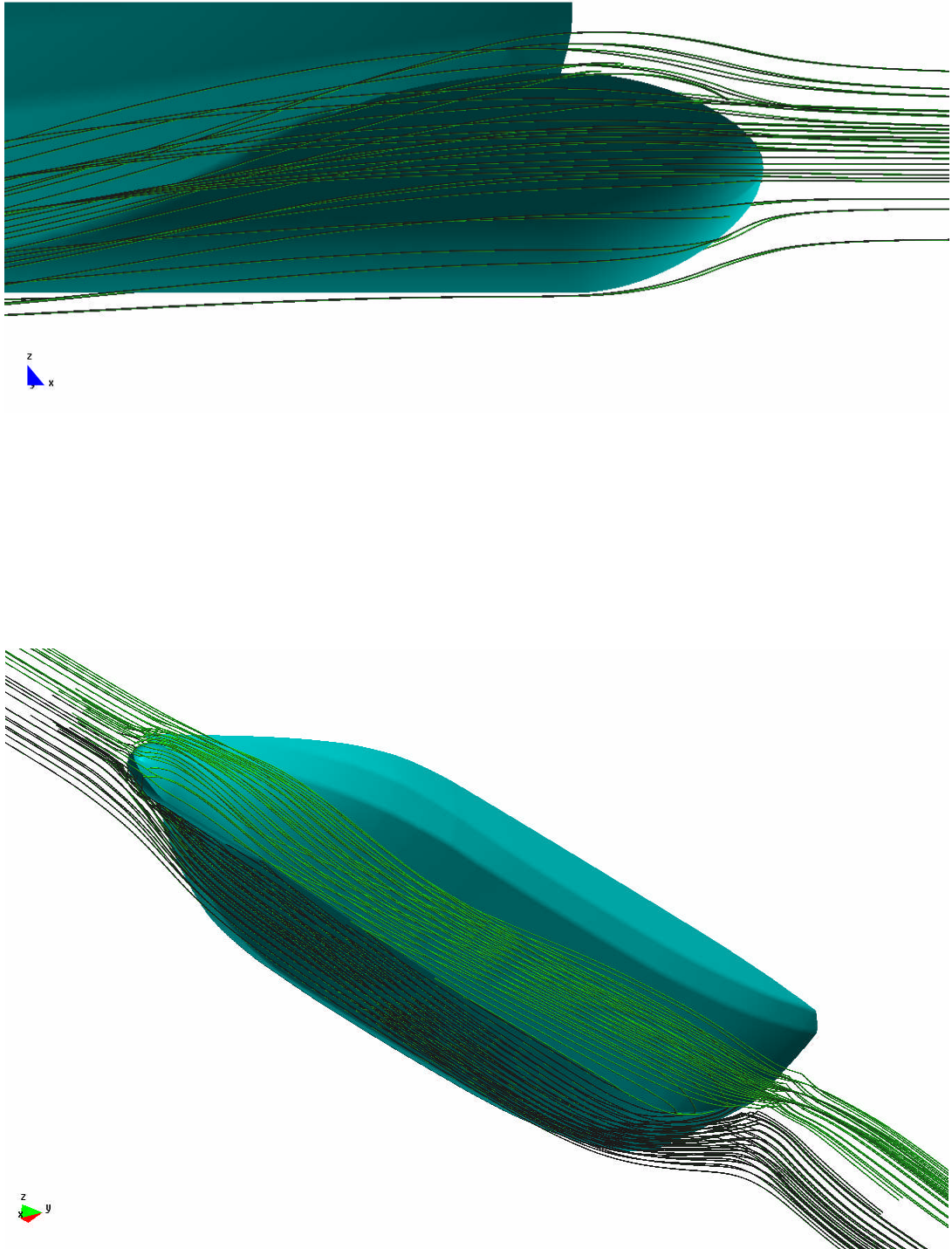


Figura 4-21: Líneas de corriente Casco-Bulbo 3.3

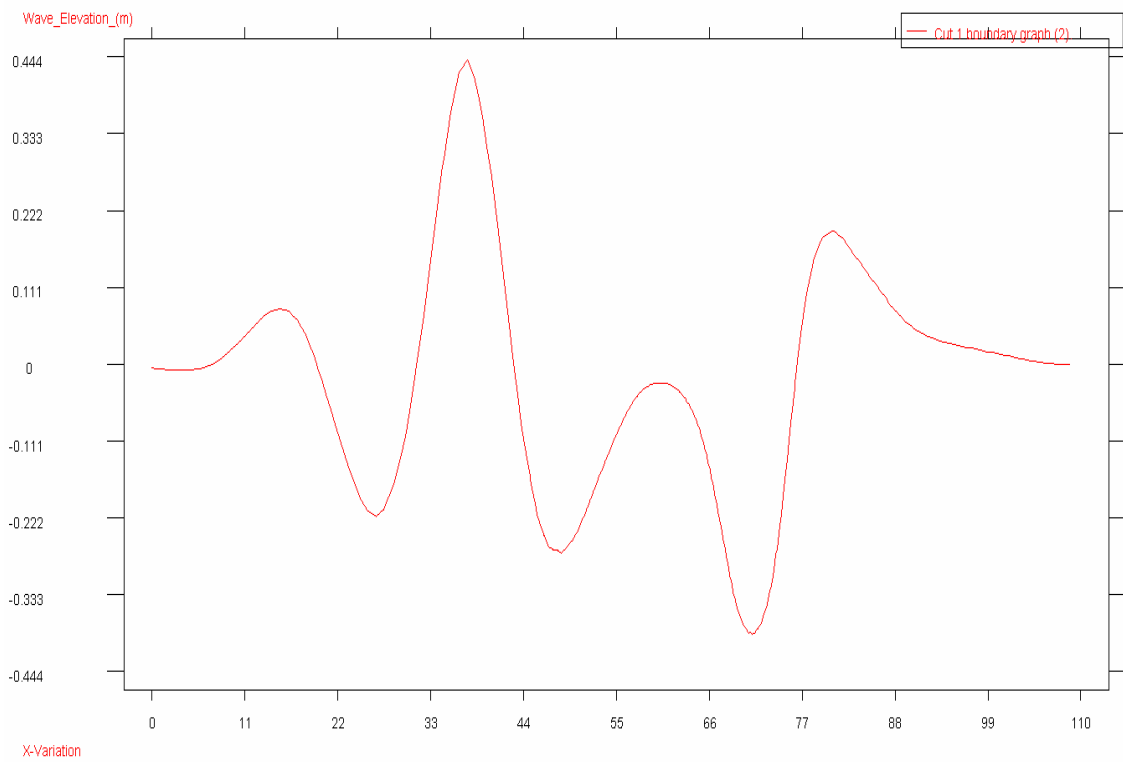


Figura 4-22: Corte de olas a 0.5665 B Casco-Bulbo 3.3

INTERPRETACIÓN DE GRAFICAS

En las figuras 4-12 y 4-17 podemos notar que la proa de la embarcación en la figura 4-12 presenta una zona de color rojo mientras que la misma zona en la figura 4-17 es de color verde. Esto es un indicativo de que la elevación de olas en la proa de la embarcación con bulbo es menor a la elevación de olas del casco "Hull". Lo que se traduce en una menor resistencia al avance.

Se observa que el casco con el bulbo 3.3 (figura 4-17) presenta menores deformaciones en la superficie libre, distribución más uniforme, que el casco "Hull" (figuras 4-12). Para un estudio más detallado recurrimos a un corte longitudinal, por ejemplo a 0.5665B, que es uno de los estándar recomendados, figuras 6-9 y 6-14. En el corte longitudinal se aprecia el mayor tamaño de los picos correspondientes al casco "Hull" (figura 4-16) con respecto al casco con bulbo (figura 4-21). Además, aunque no los presentemos aquí, realizamos mas cortes longitudinales de la superficie libre, y en todos los casos, los resultados son similares a los del corte presentado, lo que corrobora que las segundas formas son mejores.

Respecto a la distribución de velocidades y/o presiones en la carena. En este caso se aprecia como la segunda proa disminuye los gradientes a la salida del bulbo, entre la proa, y el shoulder(hombro) , ver figuras 4-13 y 4-18. Esto significa que la segunda forma se comporta mejor en términos hidrodinámicos que la primera.

Finalmente, en las figuras 4-15 y 4-20 podemos ver que las líneas de corriente, en la proa del cascos Hull (figura 4-15) es desplazada hacia delante

cuando al casco se le adosa el bulbo 3.3 (figura 4-20). Este desplazamiento reduce la resistencia al avance de la embarcación, ver figura 2-7.

4.2.3 COMPARACION DE RESULTADOS

En las siguientes tablas y gráficos se comparan los valores del coeficiente por formación de olas y potencia efectiva. Así como también los porcentajes de reducción del coeficiente por formación de olas y de la potencia efectiva.

	Cw		Hp	
	CFD-Potencial	CFD-Viscoso	CFD-Potencial	CFD-Viscoso
sin bulbo	3.558E-03	3.701E-03	372.724	281.979
Bulbo 3.1	3.006E-03	3.266E-03	346.921	261.706
Bulbo 3.2	2.808E-03	3.184E-03	333.282	261.465
Bulbo 3.3	2.711E-03	3.183E-03	326.934	255.469
Bulbo 3.4	2.699E-03	3.182E-03	326.349	255.452
Bulbo 3.5	2.827E-03	3.191E-03	335.075	261.491
Bulbo 3.6	2.955E-03	3.303E-03	343.498	262.856
Bulbo 3.7	2.947E-03	3.302E-03	342.670	263.678

Tabla 4-17: Comparación de Coeficiente de olas y Resistencia al avance

	% reducción Cw		% reducción Hp	
	CFD-Potencial	CFD-Viscoso	CFD-Potencial	CFD-Viscoso
sin bulbo				
Bulbo 3.1	15.529	11.738	6.923	7.190
Bulbo 3.2	21.098	13.967	10.582	7.275
Bulbo 3.3	23.803	13.977	12.285	9.401
Bulbo3.4	24.154	14.002	12.442	9.408
Bulbo 3.5	20.567	13.771	10.101	7.266
Bulbo 3.6	16.952	10.754	7.841	6.782
Bulbo 3.7	17.191	10.783	8.063	6.490

Tabla 4-18: Comparación de % de reducción –Coeficiente de olas y Potencia efectiva

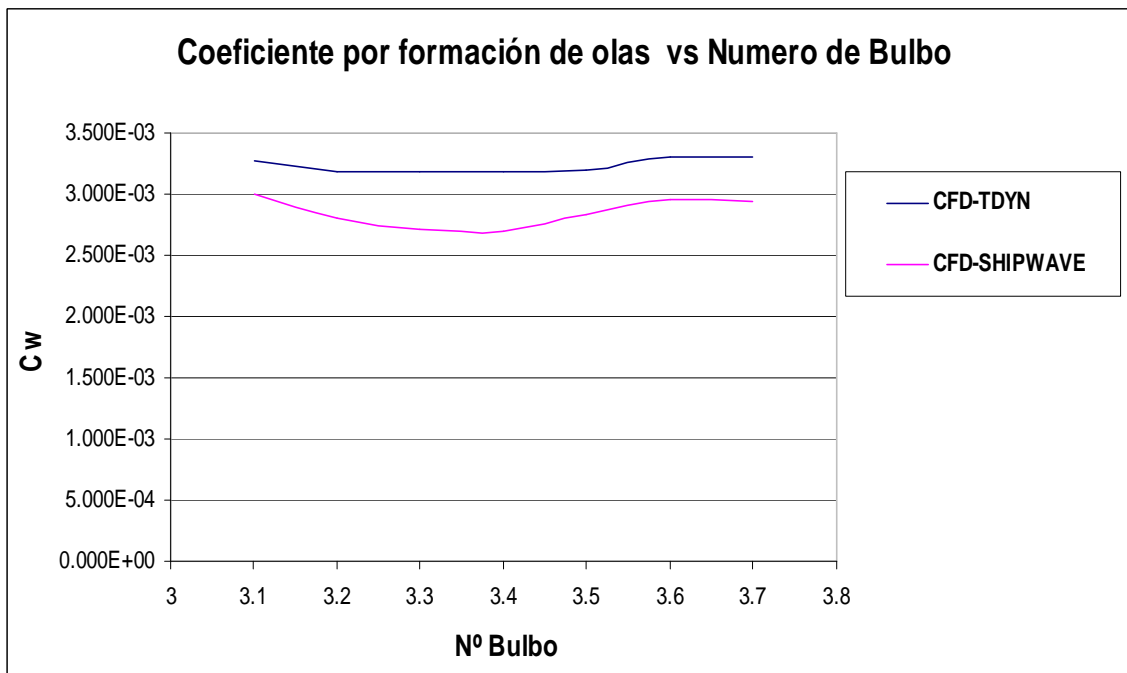


Figura 4-23: Coeficiente por formación de olas vs Numero de Froude

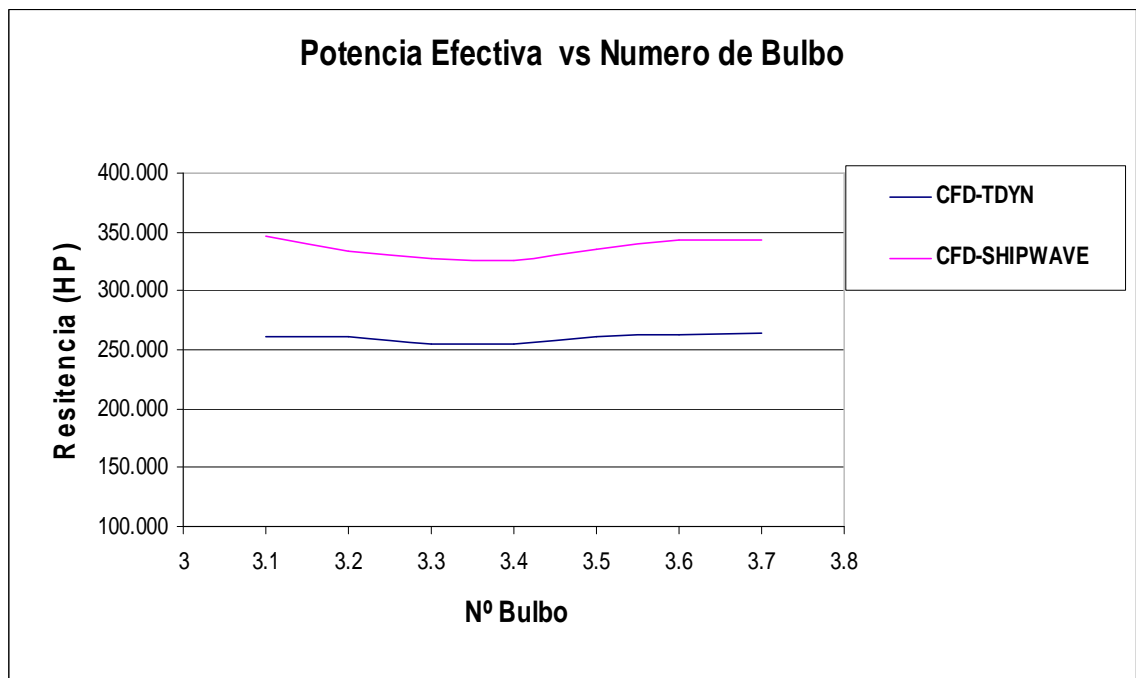


Figura 4-24: Potencia Efectiva vs Numero de Froude

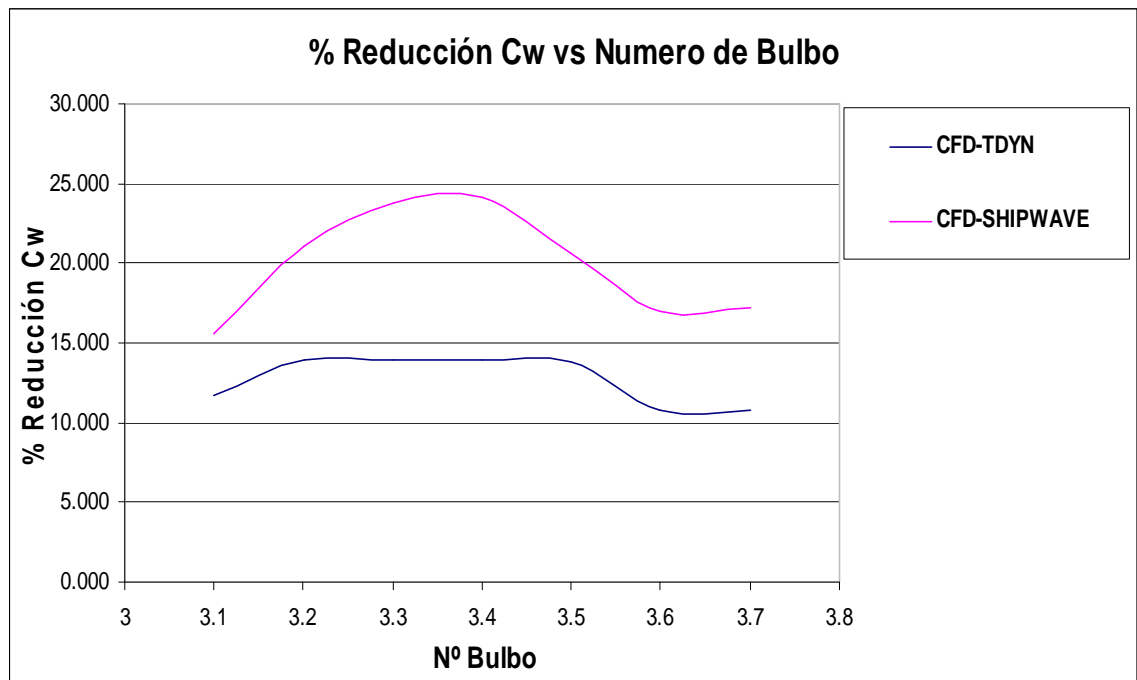


Figura 4-25: % Reducción Coeficiente por formación de olas vs Número de Bulbo

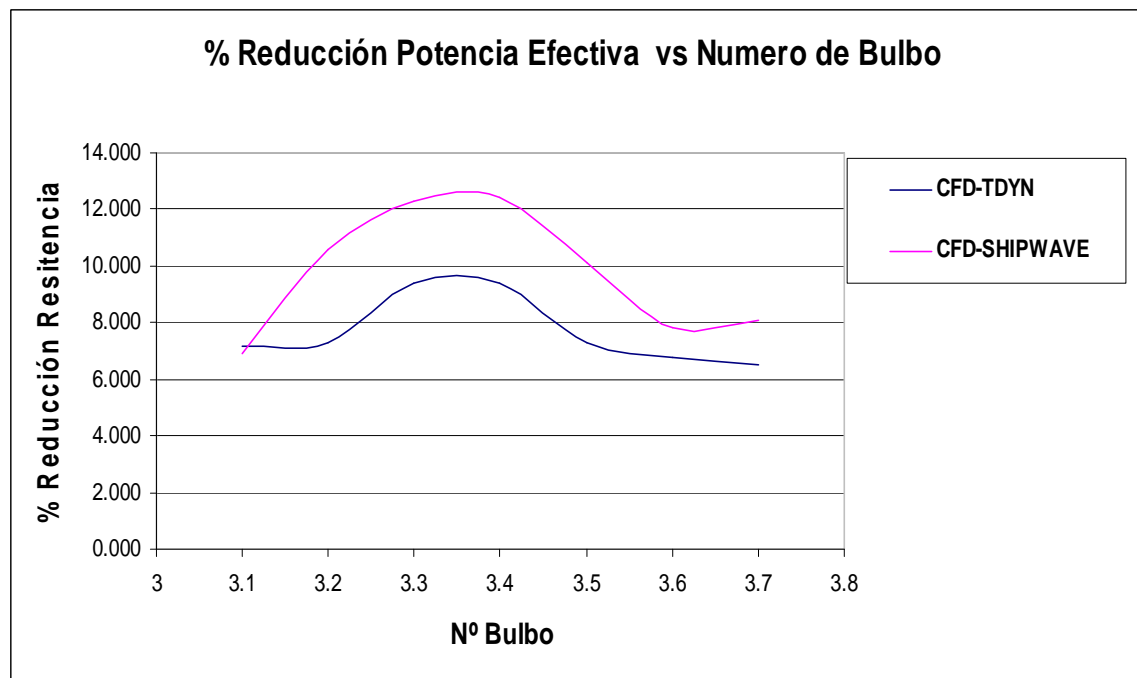


Figura 4-26: % Reducción Potencia Efectiva vs Numero de Froude

De las graficas observamos que las tendencias de las curvas tanto del coeficiente por formación de olas como de la potencia efectiva son similares para ambos códigos. Estando en el valle o cresta de dichas curvas los bulbos 3.3 y 3.4.

Por otro lado, indistintamente de las diferencias en cantidad en el coeficiente por formación de olas y potencia efectiva (ver tabla 4-17). Ambos códigos coinciden en el orden de estimación del coeficiente por formación de olas y de la potencia efectiva, como se muestra en la tabla 4-19. La tabla 4-19, se ha hecho del mejor al peor bulbo siendo el mejor bulbo, denominado con el número 1, el que más reduce el coeficiente por formación de olas y potencia efectiva.

	Orden	
	CFD-Potencial	CFD-Viscoso
sin bulbo	8	8
Bulb 3.1	7	5
Bulb 3.2	3	3
Bulb 3.3	2	2
Bulb 3.4	1	1
Bulb 3.5	4	4
Bulb 3.6	6	6
Bulb 3.7	5	7

Tabla 4-19: Ranking de bulbos

4.2.3.1 BULBO SELECCIONADO

Del análisis realizado mediante el CFD potencial y viscoso y de la comparación de sus resultados, seleccionamos el Bulbo 3.3 como bulbo optimo a ser adosado al casco. En el siguiente capítulo determinaremos el ahorro real que se consigue con este bulbo ya que como se menciona en el punto 4.22, los resultados obtenidos con los CFD son cualitativamente correctos pero cuantitativamente erróneos.

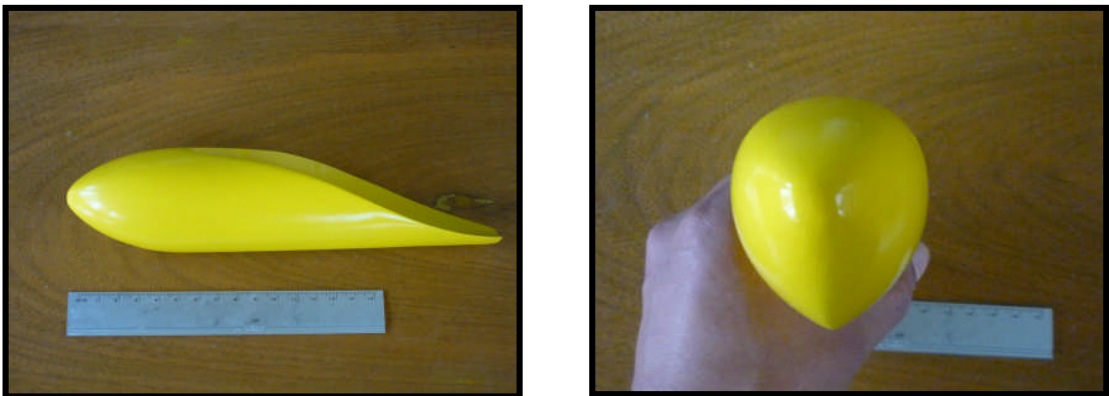


Figura 4-27: Modelo del Bulbo 3.3 –Óptimo

CAPITULO 5

ENSAYO EXPERIMENTAL

5.1 DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES

Los ensayos de resistencia se realizan en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI). El proceso de implementación del CEHIDUNI se inicio a principios del año 2005 a raíz de la inquietud de un grupo de estudiantes de la especialidad de Ingeniería Naval por desarrollar ensayos hidrodinámicos en el Perú, dada la necesidad de este tipo de estudios en la Industria naval nacional que hasta ese momento debía efectuarlos en costosos laboratorios extranjeros. El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI) fue inaugurado en noviembre del año 2005.



Figura 5-1: Canal de Experiencias Hidrodinámicas-UNI

Desde la inauguración del CEHIDUNI, diversos trabajos se han realizado, solicitados por empresas privadas. Líneas de investigación, realización de tesis, cooperación con otros centros y grupos de investigación, comunicaciones y ponencias presentados a reuniones nacionales e internacionales, son algunas de las actuaciones que se han desarrollado en los últimos años en el Canal de la UNI.

Este “canal” cuenta con unas dimensiones de 60 metros de largo, 2.5 de profundidad y 3 metros de ancho. En sus inicios el canal fue proyectado con la finalidad de brindar apoyo a los cursos que se impartían y realizar la calibración de corrientómetros.

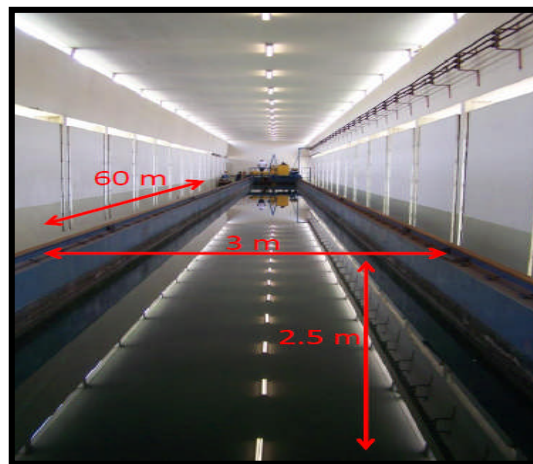


Figura 5-2: Dimensiones del Canal

Sobre los extremos del canal se ubican dos rieles sobre el cual una estructura en forma de puente, apoyada sobre un carro dinamométrico, se desplaza, poniendo en movimiento el modelo a escala de la embarcación. La alineación y nivelación de estos carriles se ha efectuado con gran precisión para evitar alteraciones de la velocidad del carro durante los ensayos. Esta estructura tiene como objetivo restringir el movimiento lateral del modelo permitiendo únicamente su desplazamiento longitudinal y vertical. Sostiene, a su vez, el sistema de poleas que

transportará la tensión ejercida sobre el modelo a través de un cable de acero hasta el dinamómetro o celda de carga ubicada en la parte superior de la estructura.

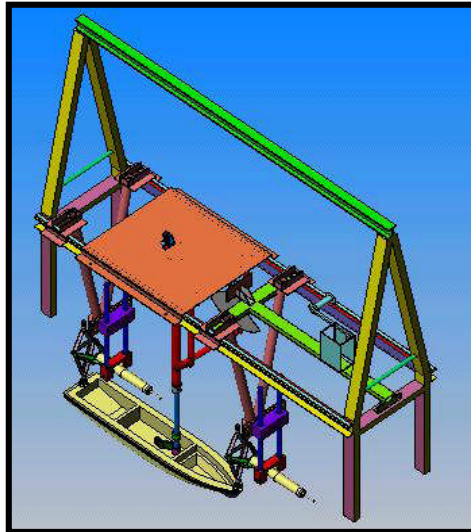


Figura 5-3: Estructura de sujeción en puente móvil

El carro dinamométrico es movido por una serie de motores de manufactura alemana marca KEMPF & RENNERS –HAMBURGO, los cuales son alimentados mediante corriente alterna y continua (trifásica), con un rango de velocidad de remolque entre 0.0002 m/s a 5.5 m/s. El carro o puente-móvil se traslada a lo largo del canal de pruebas sobre rieles y está equipado con los accesorios necesarios para remolcar el modelo semi-sumergido a velocidad regulable y registrar la fuerza de resistencia al avance del modelo.



Figura 5-4: Carro dinamométrico

La celda de carga es un sensor de tensión /compresión que nos permite –al igual que un dinamómetro- obtener el valor de la fuerza de resistencia al avance del modelo. Esta resistencia se traduce en la tensión con la que el modelo es remolcado. De ahí que el procedimiento de medición de fuerza consista en sensar la tracción con la que un alambre de acero – a través de un juego de poleas – tira del modelo.



Figura 5-5: Celda de carga

El Sistema de adquisición de datos se realiza a través de una tarjeta externa con comunicación a la PC con conexión USB. La plataforma de programación que

utiliza el “Canal” es el lenguaje LabView, software especializado en adquisición y procesamiento de datos. Las variables dependientes del tiempo involucradas en el ensayo de remolque son: a) La velocidad de avance y b) La fuerza de resistencia. La velocidad de avance es una variable que es imprescindible calcular, pues es un dato fundamental para realizar la extrapolación. El método que utiliza el canal consiste en capturar las señales eléctricas de onda cuadrada que envía el carro dinamométrico cada 10cm en su desplazamiento.

Es posible por tanto, calcular el periodo de la onda y de acuerdo a la relación $v=e/t$ obtener un valor de la velocidad cada 10cm. Para las velocidades a las que se realizan las pruebas el recalcule de velocidad se hace como mínimo cada 0,1s por lo que el dato de la velocidad se puede considerar instantáneo. La fuerza de resistencia se registra directamente de la variación de voltaje enviada por la celda de carga que comparado con el patrón de calibración del sensor nos entrega el valor numérico e instantáneo de la fuerza con la que el modelo está siendo remolcado.

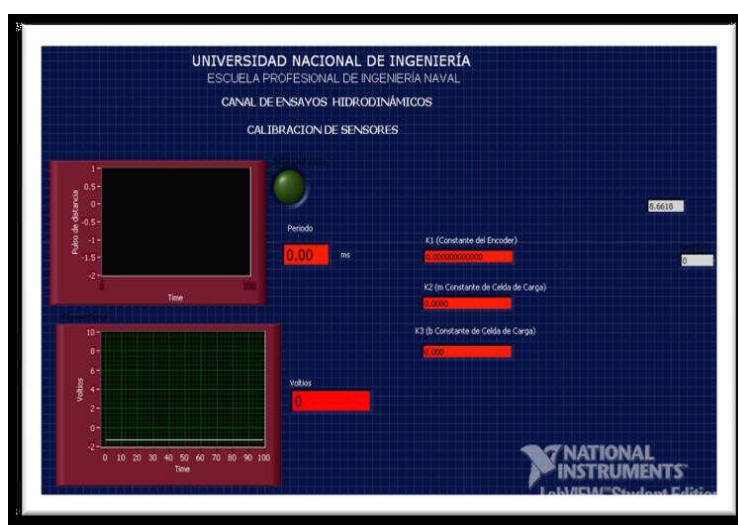


Figura 5-6: Sistema de adquisición de datos

5.2 DEFINICION DEL ENSAYO

Los ensayos en aguas tranquilas se realizan con modelos construidos en fibra de vidrio, utilizando un factor de escala $\lambda=30$. Esta escala fue elegida de tal forma que las dimensiones del “Canal” no presentaran “efectos de pared” y siguiendo las indicaciones de la International Towing Tank Conference.

A continuación resumimos el procedimiento llevado a cabo para la realización de los ensayos experimentales. Información más detallada de este procedimiento puede ser encontrada en el “Manual de Procedimiento” del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica (INIFIM 2007).

- Instalación de estructura de sujeción.
- Instalación del modelo.
- Instalación y calibración de la celda de carga.
- Operación del sistema de energía.
- Operación del sistema de remolque.
- Operación del sistema de adquisición de datos.
- Registro de datos.

El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería (CEHIDUNI) utiliza el siguiente procedimiento, como método de correlación modelo-buque, método similar al método de Froude el cual fue descrito con detalle en el capítulo 1.

La resistencia total del casco es descompuesta como:

$$R_T = R_F + R_R \quad 5.1$$

Donde:

R_F es la resistencia friccional.

R_R es la resistencia Residual.

Las fuerzas de resistencia son expresadas mediante coeficientes adimensionales de la forma:

$$C_i = \frac{R_i}{\frac{1}{2} \rho V^2 \times S} \quad 5.2$$

Donde:

S es la superficie mojada en aguas calmas.

V la velocidad del buque.

ρ es la densidad del agua

El coeficiente de resistencia del buque es determinado mediante:

$$C_{TB} = C_{FB} + C_R + C_A = C_{FB} + (C_{TM} - C_{FM}) + C_A \quad 5.3$$

Los subíndices B y M se refieren al buque y modelo respectivamente. C_R es el mismo tanto para el modelo como para el buque (hipótesis de Froude). Las pruebas de canal sirven para determinar C_R . C_A abarca en conjunto todas las correcciones, incluyendo la rugosidad, también particularidades del dispositivo de medición de los canales, errores en la línea de correlación modelo-buque. Los canales de investigación usan C_A no como una constante, si no como una función del tamaño del buque, basados en su experiencia el CEHIDUNI asigna un valor a C_A de 0.0004.

Un procedimiento más detallado de correlación modelo-buque, puede ser resumido de la siguiente forma:

- Se determina el coeficiente de resistencia total en la prueba de canal.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_M \times V_M^2 \times S_M} \quad 5.4$$

- Se determina el valor de la resistencia residual del modelo, la que es igual a la resistencia residual del buque.

$$C_R = C_{TM} - C_{FM} \quad 5.5$$

- Se determina el coeficiente de resistencia total del buque.

$$C_{TB} = C_R + C_{FB} + C_A \quad 5.6$$

- Finalmente se determina la resistencia total al avance del buque

$$R_{TB} = C_{TB} \times \frac{1}{2} \rho_B \times V_B^2 \times S_B \quad 5.7$$

Los coeficientes de resistencia friccional C_F , tanto para modelo y buque, son determinados mediante la fórmula de la ITTC de 1957.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad 5.8$$

Esta fórmula contiene un efecto global de forma incrementando el valor de C_F en 12 % comparado con el valor de placas planas de Hughes.

5.3 ENSAYOS DE REMOLQUE EN AGUAS TRANQUILAS

A continuación mostramos los resultados, en la condición de salida de puerto, tanto para la embarcación sin bulbo como para la embarcación con el bulbo de proa 3.3, el cual fue elegido basado en sus mejores características de resistencia predichas mediante los códigos numéricos.

5.3.1 MODELO SIN BULBO

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	UNIDADES
Eslora en Flotación	0,001	[m.]
Escala	30.00	
Temperatura del Agua	23.40	[°C.]
Densidad	101.89	[kg-s ² / m ⁴ .]
Viscosidad	1.27E-06	[m ² /s.]
Superficie Mojada	4.55E-01	[m ² .]

Tabla 5-1: Datos del modelo



Figura 5-7: Modelo del Casco en el Tanque de Pruebas

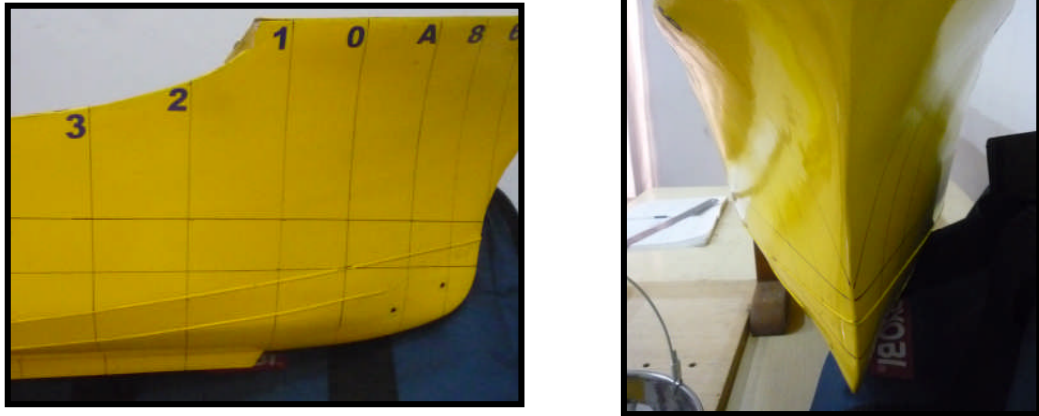


Figura 5-8: Modelo del Casco sin Bulbo de Proa

Casco limpio Condición-Salida de Puerto			
V_M (m/s)	V_B (nudos)	R modelo (Kg)	R modelo (g)
0.805	8.57	0.080	80
0.904	9.63	0.123	123
0.909	9.68	0.124	124
1.017	10.83	0.184	184
1.133	12.06	0.285	285
1.233	13.13	0.412	412
1.405	14.96	0.635	635

Tabla 5-2: Resultado del ensayo de modelo

5.3.1.1 EXTRAPOLACIÓN MODELO- BUQUE SIN BULBO

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	UNIDADES
Condición	LIVIANO	
Eslora en Flotación	43.51	[m.]
Manga	8.24	[m.]
Calado Proa	2.76	[m.]
Calado Popa	2.76	[m.]
Calado Medio	2.60	[m.]
Desplazamiento	517.67	[t.]
Superficie Mojada	409.95	[m ² .]
Densidad	1.05E+02	[kg-s ² / m ⁴ .]
Viscosidad	1.50E-06	[m ² /s.]

Tabla 5-3: Dimensiones buque

V_B	V_M	R_{TM}	R_{nM}	C_{TM}	C_{FM}	C_{RM}
Nudos	m/s	Kgs				
8.57	0.805	0.080	9.18E+05	5.30E-03	4.78E-03	5.25E-04
9.63	0.904	0.123	1.03E+06	6.48E-03	4.66E-03	1.83E-03
9.68	0.909	0.124	1.04E+06	6.48E-03	4.65E-03	1.83E-03
10.83	1.017	0.184	1.16E+06	7.66E-03	4.54E-03	3.12E-03
12.06	1.133	0.285	1.29E+06	9.57E-03	4.44E-03	5.13E-03
13.13	1.233	0.412	1.41E+06	1.17E-02	4.36E-03	7.31E-03
14.96	1.405	0.635	1.60E+06	1.39E-02	4.24E-03	9.62E-03

Tabla 5-4: Coeficiente de resistencia residual del buque

V_B	R_{nB}	C_{FB}	C_{RB}	C_{TB}	R_{TB}
Nudos					Kgs
8.57	1.28E+08	2.01E-03	5.25E-04	2.94E-03	1222
9.63	1.44E+08	1.98E-03	1.83E-03	4.21E-03	2211
9.68	1.44E+08	1.98E-03	1.83E-03	4.20E-03	2231
10.83	1.62E+08	1.95E-03	3.12E-03	5.46E-03	3632
12.06	1.80E+08	1.92E-03	5.13E-03	7.45E-03	6142
13.13	1.96E+08	1.89E-03	7.31E-03	9.61E-03	9393
14.96	2.23E+08	1.86E-03	9.62E-03	1.19E-02	15066

Tabla 5-5: Resistencia total del buque

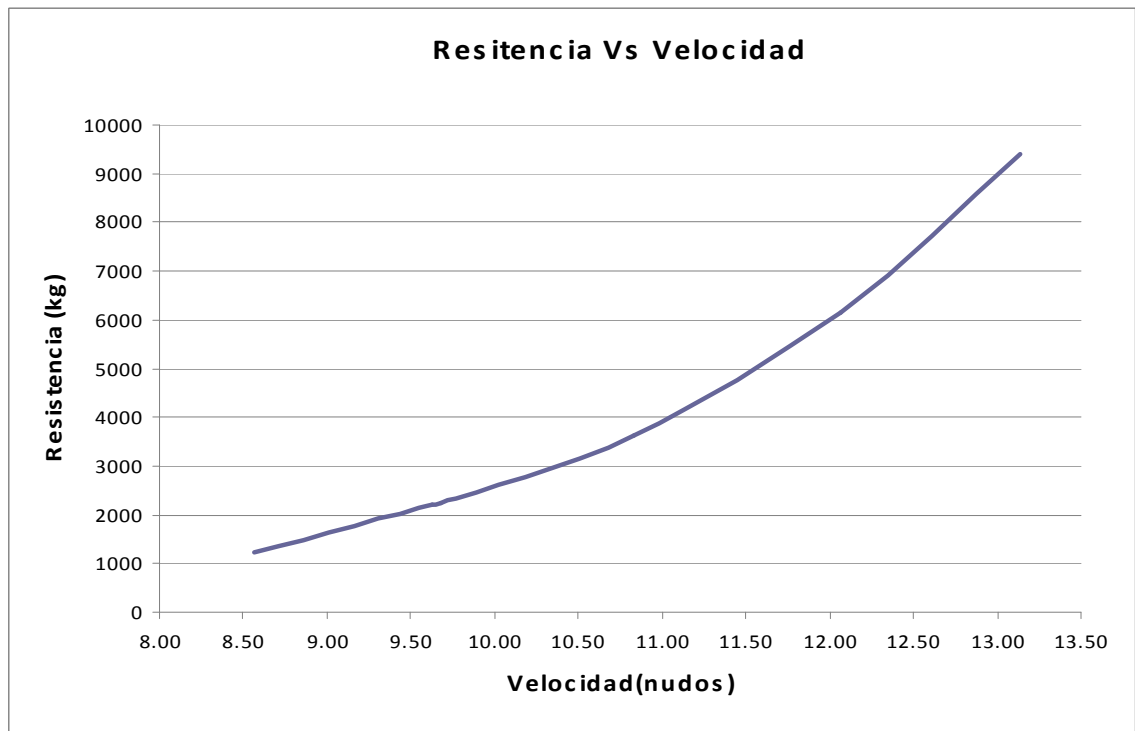


Figura 5-9: Curva Resistencia vs Velocidad del Casco “Hull”

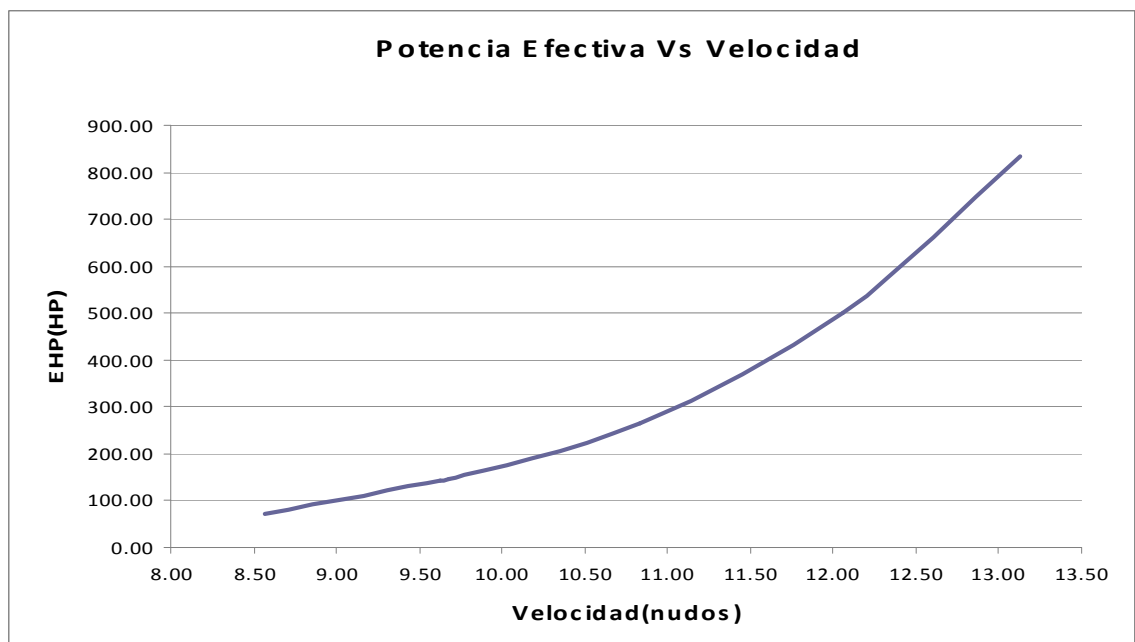


Figura 5-10: Curva Potencia Efectiva vs Velocidad del Casco “Hull”

5.3.2 MODELO CON BULBO

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	UNIDADES
Eslora en Flotación	0,001	[m.]
Escala	30.00	
Temperatura del Agua	23.40	[°C.]
Densidad	101.89	[kg-s ² / m ⁴ .]
Viscosidad	1.27E-06	[m ² /s.]
Superficie Mojada	4.55E-01	[m ² .]

Tabla 5-6: Datos del Modelo

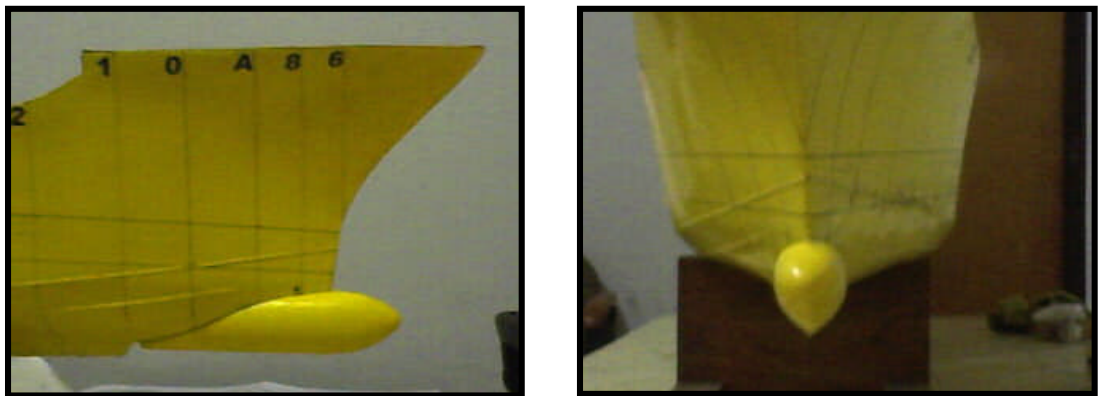


Figura 5-11: Modelo del Casco con Bulbo Optimo



Figura 5-12: Modelo del Casco en el Tanque de Pruebas

Condición-Salida de Puerto			
V_M (m/s)	V_B (nudos)	R modelo (Kg)	R modelo (g)
0.776	8.26	0.078	78
0.847	9.02	0.100	100
0.950	10.12	0.128	128
1.029	10.96	0.162	162
1.103	11.74	0.222	222
1.130	12.03	0.255	255
1.192	12.69	0.340	340

Tabla 5-7: Resultado del Ensayo de Modelo

5.3.2.1 EXTRAPOLACIÓN MODELO- BUQUE CON BULBO

Descripción	Dimensión	Unidades
Condición	LIVIANO	
Eslora en Flotación	43.51	[m.]
Manga	8.24	[m.]
Calado Proa	2.76	[m.]
Calado Popa	2.76	[m.]
Calado Medio	2.60	[m.]
Desplazamiento	517.67	[t.]
Superficie Mojada	409.95	[m ² .]
Densidad	1.05E+02	[kg-s ² / m ⁴ .]
Viscosidad	1.50E-06	[m ² /s.]

Tabla 5-8: Dimensiones Buque

V_B	V_M	R_{TM}	R_{nM}	C_{TM}	C_{FM}	C_{RM}
Nudos	m/s	Kgs				
8.26	0.776	0.078	8.85E+05	5.54E-03	4.81E-03	7.26E-04
9.02	0.847	0.100	9.66E+05	5.98E-03	4.72E-03	1.25E-03
10.12	0.950	0.128	1.08E+06	6.07E-03	4.61E-03	1.46E-03
10.96	1.029	0.162	1.17E+06	6.58E-03	4.53E-03	2.05E-03
11.74	1.103	0.222	1.26E+06	7.84E-03	4.46E-03	3.38E-03
12.03	1.130	0.255	1.29E+06	8.60E-03	4.44E-03	4.16E-03
12.69	1.192	0.340	1.36E+06	1.03E-02	4.39E-03	5.91E-03

Tabla 5-9: Coeficiente de Resistencia Residual Buque

V_B	R_{nB}	C_{FB}	C_{RB}	C_{TB}	R_{TB}
Nudos					Kgs
8.26	1.23E+08	2.02E-03	7.26E-04	3.15E-03	1222
9.02	1.35E+08	2.00E-03	1.25E-03	3.65E-03	1688
10.12	1.51E+08	1.96E-03	1.46E-03	3.83E-03	2229
10.96	1.63E+08	1.94E-03	2.05E-03	4.40E-03	3000
11.74	1.75E+08	1.92E-03	3.38E-03	5.70E-03	4470
12.03	1.79E+08	1.92E-03	4.16E-03	6.47E-03	5325
12.69	1.89E+08	1.90E-03	5.91E-03	8.21E-03	7518

Tabla 5-10: Resistencia Total del Buque

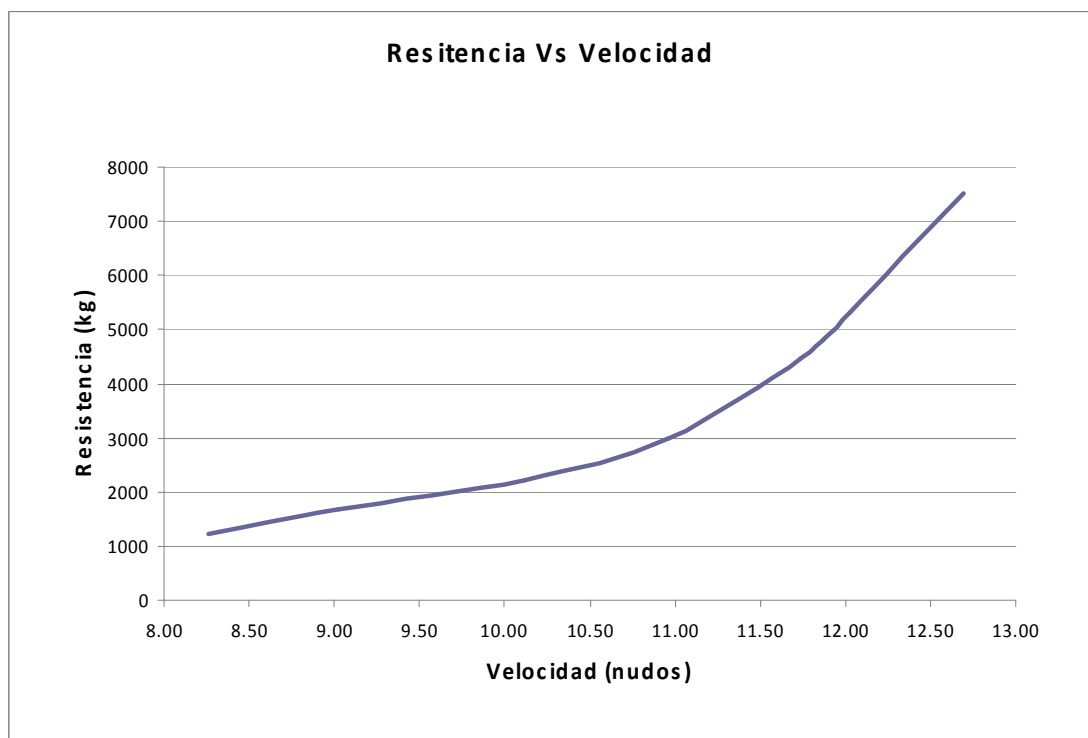


Figura 5-13: Curva Resistencia vs Velocidad del Casco "Hull"-Con Bulbo

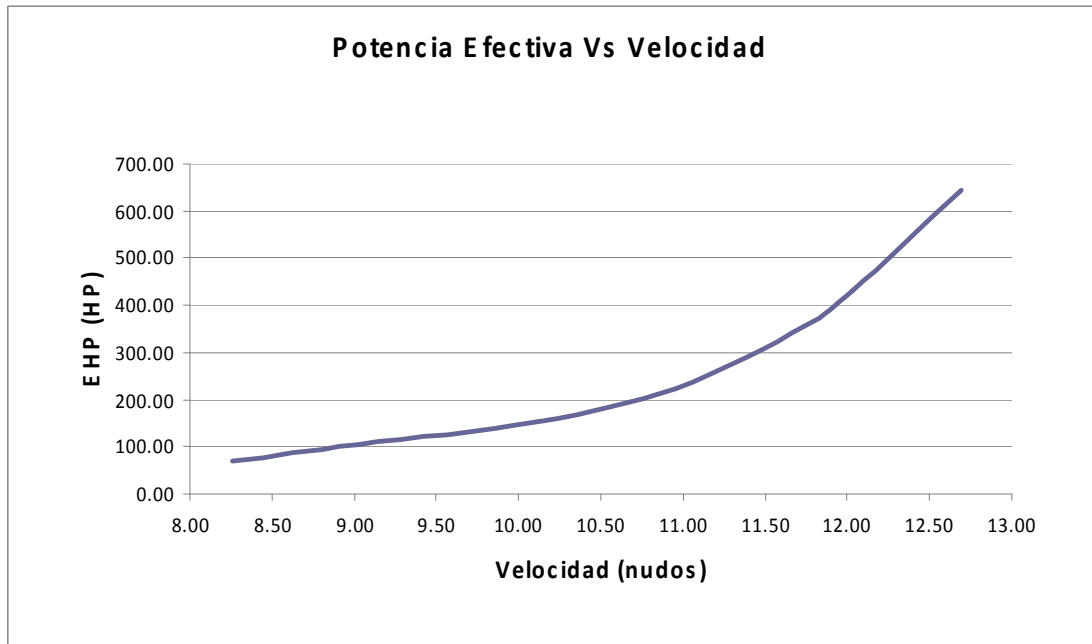


Figura 5-14: Curva Resistencia vs Velocidad del Casco “Hull”-Con Bulbo

5.4 COMPARACION DE RESULTADOS

Se muestra la curva de Resistencia versus Velocidad para la embarcación Hull con y sin bulbo de proa.

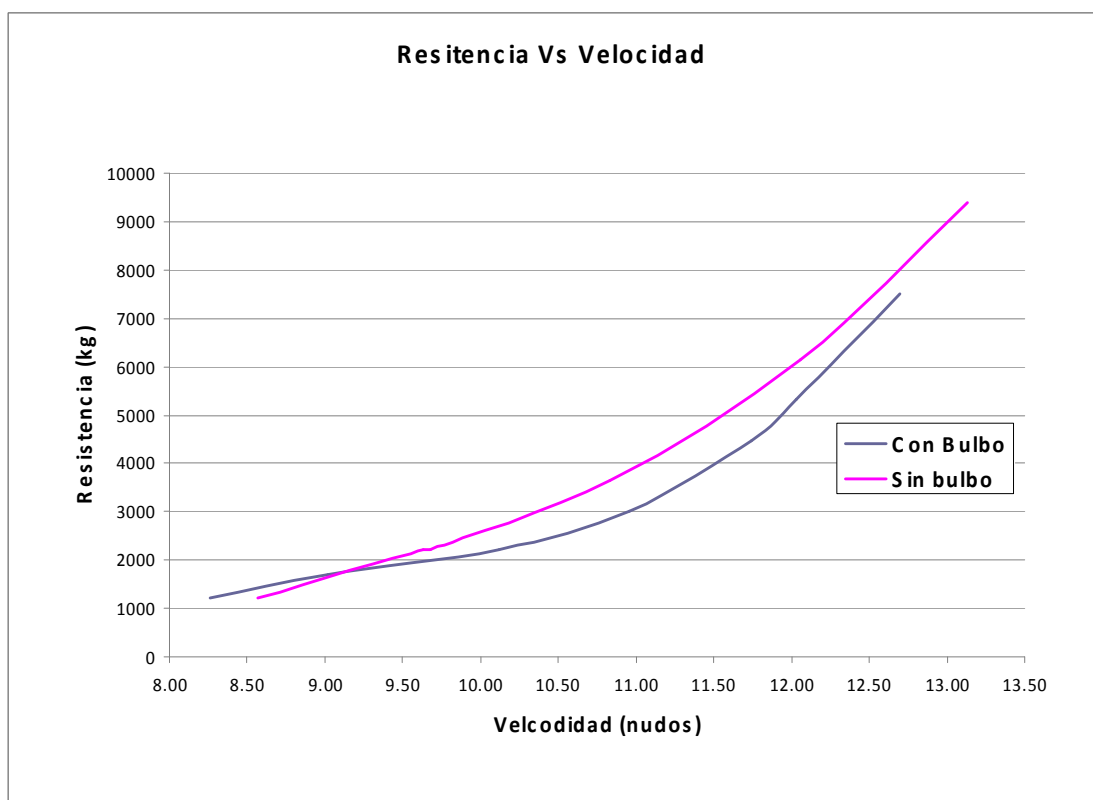


Figura 5-15: Curva Resistencia vs Velocidad del Casco “Hull”-Con Bulbo y sin Bulbo

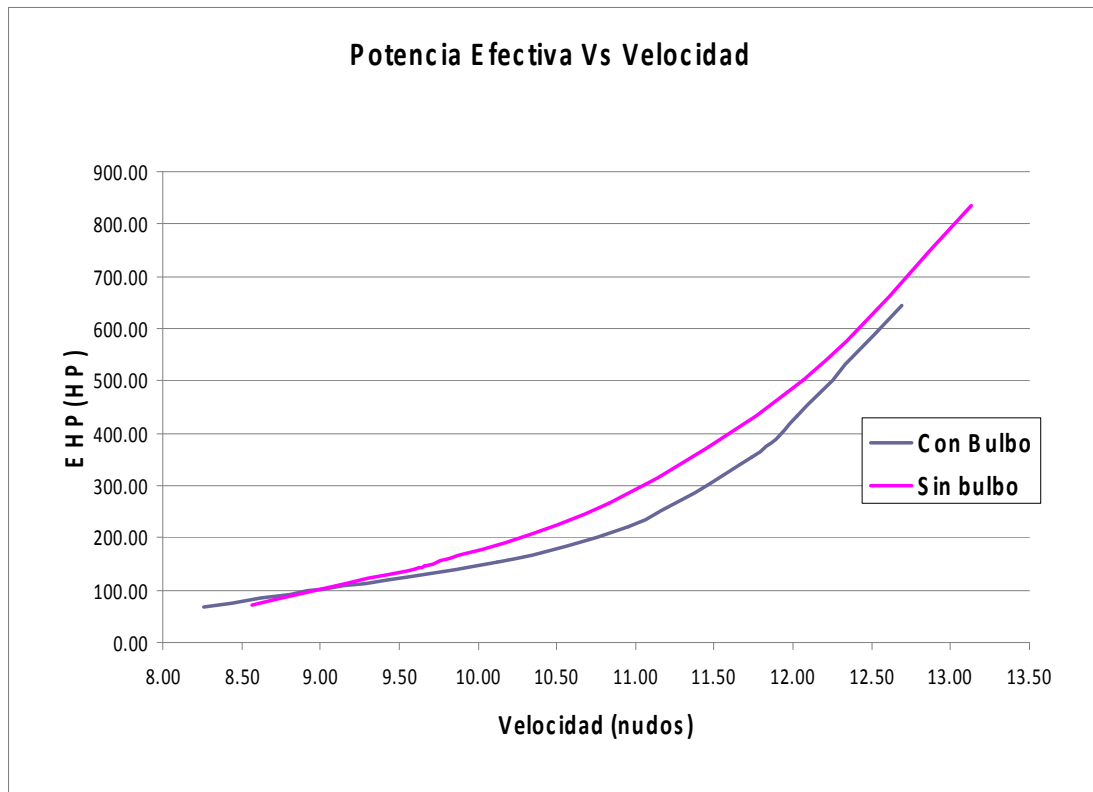


Figura 5-16: Potencia Efectiva vs Velocidad del casco “Hull”-Con Bulbo y sin Bulbo

De la grafica 5-12 podemos observar que la embarcación con bulbo de proa presenta menos resistencia al avance que la embarcación sin bulbo, dentro del rango de 9 a 13 nudos (Rango de interés).

Para la velocidad de proyecto (12 nudos) se aprecia una reducción de la resistencia al avance de 12.4 % lo cual confirma lo predicho por los códigos numéricos Tdyn y Shipwave los cuales indicaban una reducción de 9 y 12.5 % respectivamente.



Figura 5-17: Salida de Puerto Sin bulbo – 10.83 nudos

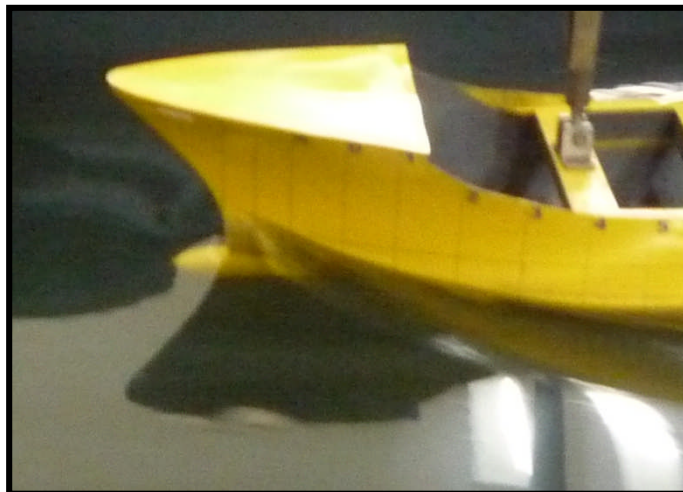


Figura 5-18: Salida de Puerto Sin Bulbo- 10.96 nudos

En la figura 5-18 se aprecia el sistema de olas de proa generado a la velocidad de 10.96 nudos, el cual es similar al de la figura 5-17, siendo la resistencia al avance total de 3632kg para la velocidad de 10.83 nudos y de 3000 kg para la velocidad de 10.96 nudos. Como podemos notar si bien es cierto ambos sistemas de olas, figuras 5-17 y 5-18, son similares la resistencia al avance es diferente siendo menor la resistencia en el caso del buque con bulbo.

Esta reducción de la resistencia al avance, de 17.4 %, se debe a la acción del bulbo de proa. El cual, como se explicó en el capítulo 1 y se puede confirmar en las figuras 5-17 y 5-18, actúa atenuando el sistema de olas de proa del buque por superposición con su propio sistema de olas, lo que reduce la resistencia por formación de olas. Si el buque mostrado en la figura 5-18 no contara con un bulbo de proa la ola de proa sería de mayor altura y por tanto su resistencia al avance sería mayor.



Figura 5-19: Salida de Puerto con bulbo- Patrón de olas de Kelvin

En la figura 5-19 podemos apreciar el típico sistema de olas generado por el avance de un buque, olas divergentes y transversales, el cual fue descrito en el capítulo 1.

CONCLUSIONES

- Fue realizada una revisión completa de los métodos semi-empíricos, existentes para el proyecto de bulbos de proa, estos fueron utilizados para el diseño del bulbo base. Fueron utilizados CFDs para optimizar el bulbo base, utilizando diversas variaciones geométricas, que no podían ser analizadas por los métodos semi-empíricos utilizados. Se consiguió obtener un bulbo óptimo en términos de resistencia al avance, cuyas características fueron verificadas a través de la realización de un ensayo de modelos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la UNI (CEHIDUNI) obteniéndose buenos y prometedores resultados. Con lo anterior expuesto se alcanzó el objetivo planteado en este trabajo de tesis, se consiguió demostrar que la utilización de CFDs, que representan la física del problema, en el proceso de optimización de bulbos de proa permiten explorar una serie de escenarios que sería poco probable de hacerlo experimentalmente, debido a los altos costos involucrados. Siendo necesaria la experimentación solamente en la etapa final del proceso de optimización.

- Con esta tesis, se desarrolló una metodología para el diseño de bulbos de proa para embarcaciones pesqueras que puede ser utilizada por los Ingenieros Navales que trabajan en el CEHIDUNI. La cual también sirve de referencia técnica para el desarrollo de futuros proyectos.
- Los CFDs permiten representar adecuadamente la física del problema de la formación de olas, los resultados de la evaluación hecha a los bulbos con los Códigos Shipwave y Tdyn coincidieron en indicar el orden de los bulbos, del más al menos eficiente. Pero, el estado actual de los CFDs (en el mundo) no permite su utilización sin una posterior comprobación experimental.
- Debido a que el problema a tratar es dominado principalmente por el fenómeno de la formación de olas, el Shipwave consiguió predecir bien el comportamiento de los bulbos durante el proceso de optimización con un tiempo de procesamiento bastante inferior al necesario por el Tdyn. Por lo tanto, en trabajos futuros, en cuando al diseño de bulbos se refiera, se podría utilizar solo el código Shipwave o algún otro CFD que utilice únicamente la teoría potencial.
- Para la velocidad de diseño (12 nudos) los códigos Shipwave y Tdyn predijeron una reducción en la resistencia al avance de 12.5 y 9.4 por ciento respectivamente. El ensayo experimental mostro que la reducción al avance para dicha velocidad es de 12.4 por ciento valor que se encuentra dentro del rango predicho por los códigos y que coincide sorprendentemente con el

valor dado por el código Shipwave. Esto demuestra que los CFDs basados en la teoría potencial pueden ser utilizados para la optimización de bulbos de proa, con buenos resultados. Siendo utilizados estos en una etapa previa a la construcción de modelos, para seleccionar aquel que tenga mejores propiedades hidrodinámicas.

- Las reglas de clasificación son estándares mínimo que un determinado diseño o proyecto debe cumplir. Estas reglas en el caso de los buques cubren diversos aspectos como estructuras, máquinas, aceleraciones, estabilidad, etc. Pero las reglas no lo dicen todo, en el caso de bulbos el desempeño hidrodinámico no es contemplado por las reglas, es decir no se especifica que cuando un bulbo es instalado, esta tenga que reducir la potencia en un determinado porcentaje (debería porque así incentivaría los ensayos del canal y la investigación ni mucho menos específica como deba ser su forma.
- Como trabajo futuro, queda que a partir de la curva de potencia calculada mediante las pruebas de canal (ver figura 5-14), se obtengan las características hidrodinámicas de la hélice, la potencia necesaria para el motor principal y se dimensione todo el sistema propulsor.
- Como trabajo futuro queda ensayar, en un canal de experiencias hidrodinámicas, la serie de bulbos proyectados en esta tesis. De esta forma se busca poder verificar las observaciones hechas a partir de los resultados, mostrados en la figura 4.9 y tabla 4-11, obtenidos con los CFDs. Estos

resultados corresponden a la aplicación del código Shipwave y a los valores de los parámetros de los bulbos proyectados. La comprobación de dichas observaciones contribuiría sustancialmente al diseño de bulbos de proa, porque al ser comprobadas las observaciones se podrían elaborar tablas de diseño para posteriores proyectos.

BIBLIOGRAFIA

Aláez, J.A., (1972), “Resistencia Viscosa de Buques”

Aláez, J. A., Pérez, L., Abad, R., Pérez, R., Souto, A., (2001), “EL Punto de vista Hidrodinámico del Alargamiento de Buques” ETSIN.

Aláez, J.A., (1995), “La Hidrodinámica del Buque de Pesca”. Publicación N0 134 del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo.

Baba, E., (1969), “A New Component of Viscous Resistance of Ships”. Journal of Zosen Kiokai. N0 125.

Baquero, A., “Lecciones de Resistencia al Avance”. Sección de publicaciones ETSIN.

Carlier, M., (1985), “Análisis hidrodinámico y Proyecto del Bulbo de Proa”, Tesis doctoral., Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.

Cueba, Obregón, Villagomez, Tello, Vásquez, Elías “Validación del canal hidrodinámico de la UNI”.UNI, INIFIM-Lima

Doust, D.S., (1967), “Trawler form With Bulbous Bows”. Fishing Boat of The World: 2, FAO, Rome.

Eckert, E. y Sharma S.D., (1973), “Bow Bulbs for Slow, Full-Form Ships”. SNAME. Technical and Research Bulletin 1-33, New York

García, A., (1990), “Predicción de Potencia y Optimización del Bulbo de Proa de Buques Pesqueros”. Publicación N^o 131 del Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo.

García, J., (2006), “Un Método de Elementos Finitos para Análisis Hidrodinámico de Estructuras Navales”, Universidad Politécnica de Cataluña.

García, J., (2006), “COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Tutorial 3D Tdyn.” Tdyn, Barcelona.

García, J., (2006), “COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Reference Manual Tdyn.” Tdyn, Barcelona.

Havelock, T.H., (1934), “The Wave Pattern and Wave Resistance”, Transactions. I.N.A

H. Schneekluth and Bertram., (1998), “Design for Efficiency and Economy”, Second edition.

Hoyle, J.W., Cheng, B.H., Hays, B., Johnson, B., Nehrling, B., (1986), “A Bulbous Bow Design Methodology for High-Speed Ships”, SNAME Transactions, Vol. 94, pp.31-56.

Kracht, A. M., (1978), “Design of Bulbous Bows”, SNAME Transactions.

Kyriazis, G., (1996), “Bulbous Bow Design Optimization for Fast Ships”, Master of Science in Ocean Systems Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.

Lewis, E.V., (1988), “Principles of Naval Architecture”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol II.

Larsson, L. and Baba, E., (1996), “Ship resistance and flow computations. Advances in Marine Hydrodynamics”, M.Ohkusu (ed.),Comp.Mech.Publ.

Larsson, L., (1994) “Use of CFD in slip Design”, SRI CFD Workshop, Proceedings, Volume 1, Tokyo, pp1-2

Martínez, A. y Valera P., (2007), “Proyecto de Atunero Congelador al cerco de 1935 m³ de Capacidad”

Meizoso, M., Alvariño, R., y Aspiroz, J., “El Proyecto Básico del Buque Mercante”. FEIN.

Morales, A., (2006), “Estudio y Optimización de una Carena Mediante un CFD”, Universidad Politécnica de Cartagena, E.T.S.I.N, Cartagena, España.

Pérez, G., “Teoría del Buque (Maquinas) Complementos de Resistencia y Propulsión”

Pérez, L., Sánchez, J.M., Zamora, R., Bermejo, R., Souto, A., (1997) “La Calidad en el Software. Validación del CFD (Computational Fluid Dynamics) “. Jornadas Ibéricas de Engenharia Naval. Lisboa.

Pérez, L., Souto, A., González, L.M., (2001), “Los CFD (Computational Fluid Dynamics) En el Diseño de Buques. Aportaciones de la E.T.S.I.N. (U.P.M.)”, IV Simposio Marítimo Internacional, La Habana, Cuba.

Pérez, L., Sánchez, J.M., Souto, A., (1996), “A Practical Application of CFD: The Optimization of a Bulbous Bow in a RO-RO Ship”, E.T.S.I.N/U.P.M, Spain.

R. Sharma y O.P. Sha., (2005), “Practical Hydrodynamic Design of Bulbous Bows for Ships” Naval Engineers Journal Volume 117, Issue 1, Pages57 – 76 2005 by the American Society of Naval Engineers.

Salhua, C.A., (2008), “Representación del Efecto del Bulbo de Proa de Embarcaciones de Desplazamiento Veloces utilizando el Método de Paneles”, I Simposio Internacional de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo y Pesca, Lima, Perú.

Salhua, C.A., (2007), “Aplicación del Método de los Paneles para la Determinación de la Resistencia al Avance por Formación de Olas de Embarcaciones de Desplazamiento”, Tesis de B.Sc., Escuela Profesional de Ingeniería Naval/UNI, Lima, Perú.

Souto, A., (2001), “Nuevas Herramientas de Diseño de Formas de Buques Basadas en Códigos de Flujo Potenciales”, Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales.

Taylor, D.W., (1933), “The speed and Power of ships”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. II.

Villagomez, Jancco, Huayhua, Olivos, Obregón., (2006).” UNI - Estudio Hidrodinámico Comparativo”, Canal de Experiencias Hidrodinámicas, Universidad Nacional de Ingeniería, INIFIM/FIM, Lima, Perú.

Villagómez, Hernández, Martínez, Huayhua, Jancco., (2005), “Ensayo de Resistencia al Avance de una Embarcación en la UNI”. CEHIDUNI Canal de Experiencias Hidrodinámicas de la Universidad Nacional de Ingeniería, INIFIM/FIM, Lima, Perú.

Wigley, W. C., (1936), “The Theory of Bulbous Bow and its Practical Application”, Transactions. NECIES

Weinblum, G., (1936), “Theorie der Wulfschiffe”, Schiffbau Bd.37.

Wahab, R., (1965), “Research on Bulbous Bow Ships. Part 1.B: The Behaviour of a Fast Cargo Liner with a Bulbous Bow in a Seaway”. International Shipbuilding Progress.

Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica (2007) “Canal de Experiencias Hidrodinámica de la Universidad Nacional de Ingeniería-Manual del Usuario”, Escuela profesional de ingeniería naval, Universidad Nacional de Ingeniería.