



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Naval

“OPTIMIZACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE DE UN MULTICASCO A TRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y FLUJOS POTENCIALES”

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Naval
Mención: Arquitectura Naval
Mención: Transporte Marítimo

Profesor Patrocinante:
Sr. Marcos Salas Inzunza.
Ingeniero Naval.
Licenciado en Ingeniería Naval.
M.Sc. en Ingeniería Oceánica.
Doctor of Philosophy (Ship Science)

JAVIER EDUARDO BENARD GACHELIN
VALDIVIA - CHILE
2007

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de: **Ingeniero Naval**, mención **Arquitectura Naval y Transporte Marítimo**.

EXAMEN DE TITULO:

Nota de presentación	(Ponderada) (1)	: 4,334
Nota de examen	(Ponderada) (2)	: 1,300
Nota Final de Titulación	(1+2)	: 5,634

COMISIÓN EXAMINADORA:

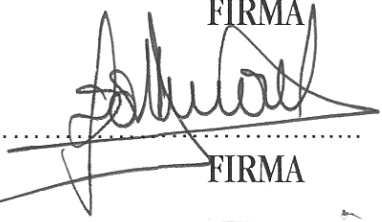
DR. ROGERIO MARIANO M.
DECANO


FIRMA

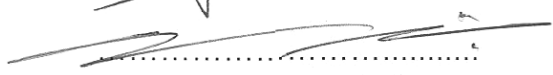
DR. MARCOS SARAS I.
EXAMINADOR


FIRMA

DR. RICHARD LUCCO S.
EXAMINADOR


FIRMA

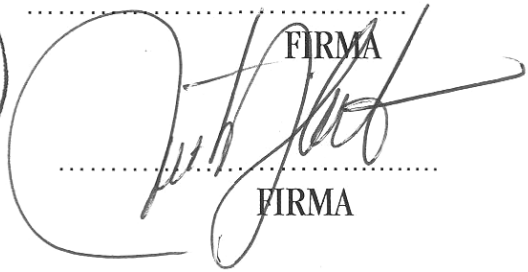
PROF. NELSON PEREZ M.
EXAMINADOR


FIRMA

EXAMINADOR

PROF. MARITZA LOBOS
SECRETARIO ACADÉMICO




FIRMA

Valdivia, 19 OCTUBRE 2007

Nota de Presentación	=NC/NA * 0.6 + Nota de Tesis * 0.2
Nota Final	=Nota de Presentación + Nota Examen * 0.2
NC	=Sumatoria Notas Currículum, sin Tesis
NA	=Número de asignaturas cursadas y aprobadas, incluida Práctica Profesional.

Resumen

En este trabajo de investigación se ha optimizado la resistencia al avance de un catamarán de tráfico fluvial. La optimización automática fue hecha utilizando un programa de algoritmos genéticos con la evaluación de un método numérico potencial que describe la formación de las olas de la embarcación. Finalmente se realizó una validación del prototipo optimizado en el canal de pruebas hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile.

Summary

In this research work the resistance of a river's tour catamaran has been optimized. The automatic optimization was made using genetic algorithms, with the evaluation of potential method to calculate the elevation of the vessel's waves wake. Finally, a validation of the optimized prototype was carried out at the towing tank of Universidad Austral de Chile.

Índice

Capitulo 1: Introducción general	Pagina
1.0 Introducción	5
1.1 El Wake wash	6
1.1.1 Impacto a la seguridad en la navegación	6
1.1.2 Erosión del borde costero	6
1.1.3 Impacto ambiental	6
1.1.4 Legislaciones que restringen el wake wash	7
1.1.4.1 Principio básicos de la legislación danesa	7
1.1.4.2 Principio básicos de la legislación inglesa	8
1.2 Teoría de la formación de olas	9
1.3 Patrón de olas en aguas restringidas	10
1.4 El método de Michell	14
1.5 Consideraciones en un multicasco	16
1.5.1 Los multicasco actuales	16
1.5.2 Parámetros que afectan en la resistencia al avance	17
1.5.3 Espaciamiento entre ambos cascos	17
1.5.4 Consideraciones para reducir el wake wash	17
1.6 Definición de la embarcación base	18
Capitulo 2: investigación empírico	
2.1 Modelación de los cascos	19
2.1.1 Introducción del casco base	20
2.2 El programa Michlet 8.0	21
2.2.1 Calculo de resistencia al avance	22
2.2.3 Calculo de elevación de olas	22
2.3 Optimización por algoritmos genéticos y estrategias evolutivas	23
2.3.1 Modulo optimizador GODZILLA	24
2.3.2 Función controladora de formas	24
2.3.3 Edición de la planilla de optimización	26
2.4 Estrategia para la optimización	26
2.4.1 Verificación de malla de integración	27
2.4.2 Consideraciones iniciales	28
2.4.3 Tendencias y resultados obtenidos	28
2.4.3.1 Optimización para una velocidad de 8 nudos	29

2.4.3.2 Optimización para una velocidad de 10 nudos	31
2.4.3.3 Optimización para una velocidad de 12 nudos	33
2.4.3.1 Optimización para el rango de 8 a 12 nudos	34
2.5 Selección del modelo optimizado final	36
2.5.1 Evaluación entre el modelo base y el optimizado	37
2.6 Validación en el canal de pruebas hidrodinámicas	38
2.6.1 Características del canal de pruebas hidrodinámicas	38
2.6.2 Método para realizar las mediciones	38
2.6.3 Características de los modelos de ensayo	38
2.6.4 Recopilación de datos	39
2.7 Conclusiones de la experiencia empírica	40
Capítulo 3: Conclusiones generales	
3.0 Conclusiones generales	
3.1 Validación de la metodología de optimización	41
3.2 Aplicabilidad a un caso real	41
3.3 Conclusiones operacionales entre el diseño base y el optimizado	41
Apéndice: anteproyecto virtual	
3.1 Consideraciones generales	42
3.2 Generación del modelo virtual	42
3.2.1 Requerimientos generales de espacios	43
3.2.2 Concepto involucrado en el diseño	43
3.2.3 Verificación ergonómica de espacios	43
3.2.1 Arreglo general desarrollado	45
Referencias	47

Agradecimientos:

A mi mama, por ser mi apoyo incondicional en mi vida, y que formo en mí un carácter de lucha y determinación por cumplir mis metas.

A mi papa por entregarme la curiosidad de saber por que funcionan las cosas y ser la enciclopedia de ingeniería que me mostró el hermoso mundo de la aeronáutica y la técnica aplicada, el cual me motivo a estudiar lo que hoy es mi pasión.

A mi hermano, compañero de infinitas discusiones técnicas sin sentido y todavía pendientes.

A mi abuelita, que siempre me entrego su amor y su preocupación hasta el ultimo día que pude estar con ella, y que hoy sigue conmigo en mi corazón.

A esa niña que en 2º año cruzo la mirada conmigo y que me acompaño en esta experiencia entregándome su amor.

A los docentes que marcan la diferencia, y que nos motivan a seguir adelante cuando la vocación nos abandona.

Y finalmente como olvidar a la cofradía naval, compuesta por todos los amigos y amigas que unidos por la pasión de la vela como pretexto, llevamos a cabo múltiples proyectos en los que no solo construimos cosas sino compartimos momentos de alegría y frustración. Que fueron el mejor complemento de una ajetreada vida universitaria. Bueno nos vemos en "Chile Team Challege 20??", buenos vientos para todos.

Capítulo 1: Introducción general

1.0 Introducción

La formación de olas debido al paso de un cuerpo a través de un fluido ha sido un fenómeno evidente desde que el hombre observó el agua y sus embarcaciones pasando sobre ella. No fue hasta el siglo 19 que se logró generar los primeros modelos matemáticos que describían el comportamiento de los fluidos y relacionarlos a la Arquitectura naval, de este modo optimizando sus diseños. Nombres como los de William Froude, Kelvin, Michell y otros lograron relacionar la formación de olas que producían las naves con la resistencia al avance.

Mucho tiempo y energía se dedicó para lograr razonables predicciones de resistencia al avance, incluso hoy lograr una optimización de 1% a un 3% es un hecho notable. Con la aparición de naves más rápidas que navegan en cercanías de la costa y bahías, también se ha evidenciado lo agresivas que son sus estelas con el borde costero, su flora y fauna, como con las demás embarcaciones que transitan en las cercanías. Este hecho tomó particular relevancia cuando un pescador inglés falleció al volcar su embarcación producto de una ola de estela producida por un ferry de alta velocidad (Marine Accident Investigation Branch 1999) a la vez que numerosos estudios de biólogos marinos junto a oceanógrafos constataban el efecto de estas estelas en el borde costero. Debido a esto, múltiples autoridades portuarias dispusieron niveles máximos de alturas de ola. Esto ha llevado a los Arquitectos Navales a no descuidar este punto durante el desarrollo del proyecto.

El trabajo propuesto tiene como meta utilizar la formulación matemática que desarrolló J.H Michell (1998), a comienzos del siglo 20 para predecir las alturas de olas de la estela de un cuerpo esbelto, y que ha sido programada en una interfase informática como elemento evaluador en una programación de algoritmos genéticos para plataformas simples y económicas, que permite optimizar y evaluar un multicasco y mejorar su tren de olas y al vez por consecuencia su resistencia al avance. Una vez desarrollada la investigación en la plataforma informática se realizaron ensayos en el canal de pruebas hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile con modelos a escala, donde se evalúan el diseño inicial y el final obtenido en la plataforma informática.

Finalmente se desarrolla el anteproyecto de una embarcación de turismo menor basada en la plataforma estudiada, destinada a operar en humedales con un mínimo impacto a la flora y fauna, esto como una de las aplicaciones prácticas de este trabajo.

1.1 El Wake Wash

Realmente no existe una traducción directa de wake wash, pero su significado hace referencia a la perturbación del agua producto del paso de una embarcación y los efectos globales que ello conlleva en el medio. Las magnitudes que en ella influye son la altura, velocidad de propagación y longitud de la ola producida por la embarcación.

Estas olas generadas por las embarcaciones producen casi nulas consecuencias en alta mar o aguas alejadas de la costa, el problema del wake wash se suscita en aguas de baja profundidad y zonas costeras como bahías, canales y redes fluviales de navegación. Los problemas generados en estas condiciones se pueden dividir en los que tienen un carácter de impacto a la seguridad en las vías navegación, erosión del borde costero y el impacto ambiental generado a la flora y fauna.

1.1.1 Impacto a la seguridad en la navegación

En zonas donde el tráfico marítimo es muy denso y operan distintos tipos y tamaños de embarcaciones, los ferrys de alta velocidad se han convertido en un verdadero problema para las autoridades portuarias, ya que las olas de estas embarcaciones afectan a la seguridad de las menores debido especialmente a la velocidad de propagación de estas olas que al llegar a zonas más someras debido a su gran energía incrementan mucho su altura, lo que se ha traducido que embarcaciones menores que salen a navegar en condiciones de estado de mar optimas se encuentren con olas de hasta 4 metros de altura que las hacen zozobrar (Marine Accident Investigation Branch 1999 y Herreros y Souto, 2001).

1.1.2 Erosión del borde costero

El tema de la erosión es producto del impacto de las olas rompientes en la costa y su consecuente modificación. Es un tema relevante en algunas vías de navegación, ya que aumenta la sedimentación del fondo, reduciendo el calado operativo de la misma y su funcionalidad.

1.1.3 Impacto ambiental

Cualquier elemento nuevo en un ecosistema generara un impacto ambiental, lo difícil es cuantificarlo, y si este será positivo o negativo para el mismo. Son muchos los estudios (Bishop, 2003 y Agreement FTA 2005) que han demostrado la mala influencia del wake wash en la flora y fauna de una bahía o borde costero. Se han citado ejemplos como que las olas destruyen los nidos que las aves, como

el cisne de cuello negro, que construyen sus nidos a ras de agua en la flora que nace en el borde costero, perjudicando de esta manera el ciclo de anidación de las aves. Otro ejemplo es que las olas al romper y erosionar la costa la modifican, esto genera que la flora costera a la vez se vea perjudicada ya que no estaba preparada para esta nueva condición, eliminando sub ecosistemas que ellos mismos generaban con sus respectivas consecuencias.

En este trabajo se busca reducir el wake wash que produce una embarcación turística tipo, que opera en una reserva ecológica, de esta manera reduciendo el impacto ambiental producto de la explotación turística de la reserva.

1.1.4 Legislaciones que restringen el wake wash

Los buques de alta velocidad que operan en las aguas de ciertos países tienen restricciones en velocidad y rutas debidas a los efectos que producen las olas de las estelas por estos generadas. Al tener la certeza durante la etapa de proyecto de que esas restricciones van a afectar la operación del buque se ha convertido en un problema importante para los diseñadores y constructores de barcos rápidos, especialmente ferrys que operan cercano s a las costas o embarcaciones que realizan turismo en zonas ecológicas protegidas, siendo este ultimo el caso que se trata en este trabajo. Ello es debido a que estas condiciones de "low wash" se estipulan de modo muy preciso en el contrato de construcción del buque cuando deben cumplir una norma. En este trabajo uno de los objetivos es disminuir los efectos de la estela (wake wash) para una embarcación menor que opere en aguas interiores de un humedal que es reserva natural de la biosfera, por lo cual los criterios existentes son de difícil aplicación para este caso pero sin duda es conveniente revisarlos para obtener una orientación de las normas internacionales y que en Chile son inexistentes.

En lo que se refiere a las normas hay dos grandes filosofías, las encarnadas por la norma inglesa y por la norma danesa. La norma danesa es del año 1997 y la norma inglesa es del año 2000. Si bien estas normas están lejanas de ser aplicadas a la embarcación evaluada en este trabajo nos dará una orientación de cómo los gobiernos tienen una preocupación por el tema.

1.1.4.1 Principios básicos de la legislación danesa.

Hay un estudio inicial y básico en lo que se refiere a temas de wake wash debido a Kofoed-Hansen (1996), del instituto danés de costas, a raíz del cual el gobierno danés estableció una comisión para regular estos problemas en octubre de 1996. El objetivo del mismo era preparar una reglamentación para la protección del

medio ambiente marino, la protección de costas y para una navegación segura. Según este criterio el armador debe demostrar que el buque no supera un determinado nivel de altura de ola durante todo el recorrido. En el comité había representantes del sector marítimo, de organizaciones que tenían relación con el medio ambiente, y de otras organizaciones no gubernamentales que estaban relacionadas con temas marítimos. El informe del comité se emitió en Febrero de 1997. Ahí se indicaba la posibilidad de establecer, no sólo para las olas, sino también para temas de ruido y de contaminación ambiental, una serie de normas. En lo que se refería a la vida marina, parecía sin embargo, que era muy difícil en aquel momento establecer criterios objetivos al respecto. Por esta razón, este tema recibe un tratamiento individualizado.

En lo que se refiere a la seguridad y a actividades recreativas, la autoridad marítima danesa ha incluido una serie de consideraciones en el Acta de Seguridad y Navegación, Regla 307 en el apartado correspondiente a ferries de alta velocidad. En ésta se establece que el armador debe demostrar que el buque no supera un límite en sus olas dado por la formula (1),

$$H_h \leq 0.5 \sqrt{\frac{4.5}{T_h}} \quad (1)$$

donde H_h es la altura máxima en metros de las olas de periodo largo que tienen un periodo medio de T_h segundos. El criterio se aplica en aguas tranquilas de 3 metros de profundidad, que es donde las embarcaciones menores pueden ser afectadas. Suponiendo que el periodo medio de las olas de periodo largo es aproximadamente 9 segundos a 3 metros de profundidad, el criterio proporciona una altura límite H_h de 0.35 metros. Este criterio está basado en asumir que las olas generadas por los buques convencionales se consideran como aceptables en las aguas danesas. Además de este criterio hay una serie de reglas referidas a las normas de protección del medio ambiente marino y de la protección de costas que también tienen que ser respetadas para conseguir el permiso para navegar. El criterio citado es muy restrictivo ya que la exigencia se extiende a todas las aguas, y no sólo a aquellas sensibles a los problemas con las olas.

1.1.4.2 Principios básicos de la legislación inglesa.

La Agencia Marítima y de Costas británica (Maritime and Coastguard Agency, MCA), exige también a los armadores de buques rápidos operando en los puertos

del Reino Unido que incluyan en la solicitud de permiso un estudio completo de los riesgos de impacto debidos al *wake wash*. Esta decisión se basa en recomendaciones emitidas por la Oficina de Investigación de Accidentes Marítimos (Marine Accident Investigation Branch, MAIB) durante el año 2000, a raíz de una investigación realizada por esta institución sobre la muerte de un pescador en Julio de 1999. El accidente ocurrió cuando una ola, generada por el HSS 1500 Stena Discovery, de 4030 t de desplazamiento y que navega a 40 nudos, creció en amplitud hasta llegar a los cuatro metros al entrar en aguas poco profundas de la zona de Harwich en el Reino Unido. Esta ola rompió y provocó el vuelco de un bote, provocando la muerte del pescador. Un accidente similar había sucedido en Kalundborg, a la entrada del puerto, en Dinamarca, en 1996, aunque el resultado no había sido tan grave (Herreros y Souto, 2001) .

La legislación inglesa exige una evaluación de riesgos realizada de acuerdo con el código para embarcaciones rápidas de la Organización Marítima Internacional. La evaluación debe incluir una identificación de las zonas problemáticas, una evaluación del impacto del *wake wash* en esas zonas, y de las probabilidades de que esos problemas sucedan. Por tanto, los criterios ingleses se apoyan en métodos cualitativos de estimación de riesgos, mientras que la legislación danesa es mucho más restrictiva al respecto. Así, la bahía de Belfast, en Irlanda del Norte, fue sometida a un estudio muy específico y detallado para optimizar las condiciones de operación de los buques que cubren las rutas que parten de allí. Una de las más importantes está cubierta por un buque similar al Stena Discovery. Se trataba de ver en qué medida, las condiciones batimétricas del fondo de la bahía influían en la propagación y generación de las olas. El resultado del estudio fue una modificación de las rutas de entrada y salida del puerto.

1.2 Teoría de formación de olas de un cuerpo flotante en movimiento

Uno de los primeros científicos que intentaron comprender el comportamiento de los fluidos en movimiento fue el connotado Leonardo Da Vinci. Como se ha encontrado en sus notas que describen sus interminables observaciones donde buscaba la explicación para la formación de las olas y los vórtices en las corrientes de los ríos.

Si a Froude se le conoce por su amplio trabajo en el campo de la resistencia al avance con su ley de similitud, la explicación básica del sistema de olas que genera cualquier cuerpo flotante se le atribuye a Lord Kelvin (1887). Quien considero un simple punto de presión que se mueve sobre la superficie del agua,

el cual genera un patrón de olas característico. Donde se considera un tren de olas transversales que van detrás del punto de presión, junto con una serie de olas divergentes que se irradian desde el punto de presión y que forma un ángulo de $19^{\circ}28'$ con respecto a la línea de avance. Las olas transversales se mueven a la misma velocidad del buque y su longitud puede ser deducida por la formula 2:

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot V^2 / g \quad (2)$$

Para el caso de las embarcaciones es posible distinguir mas de un patrón de olas de Kelvin, por lo general uno en la proa y otro en la popa. Como antes se menciono la longitud de la ola se puede deducir a partir de la velocidad del buque, esto fue lo que relaciono Froude y que relaciona el numero adimensional que lleva su nombre, en otras palabras la longitud de las olas transversales del primer punto de presión del buque que es la proa. Es por esto que cuando una embarcación llega a Fn cercano a 0.40 , la longitud del primer tren de olas transversales coincide con la longitud de la embarcación induciendo un trimado que eleva exponencialmente la resistencia al avance además de la altura de las olas generadas.

De todas formas hoy se tiene el conocimiento que la formación de olas es producto de la distribución de presiones alrededor del casco debido a las velocidades del flujo que lo envuelve y no de un solo punto de presión. Pero la formación de olas es solo posible si existe una superficie libre de fluido en contacto con otro, en este caso el agua con el aire. Ya que los cuerpos sumergidos en movimiento también desarrollan una distribución de presiones producto de las velocidades alrededor del casco pero sin la cercanía de la superficie libre no generan olas.

1.3 Patrón de olas en aguas restringidas

En el punto anterior se habló del aspecto del patrón de olas cuando el buque navega en aguas profundas. Sin embargo hay muchas definiciones del término "aguas profundas". Para los ingenieros navales (costas, oceanográficos y otros), una ola se propaga en aguas profundas cuando la relación (h/L) entre la profundidad y su longitud es superior a $1/2$. En estas condiciones, las características de la ola son independientes de la profundidad: la ola no percibe el fondo. Para las olas generadas por un buque, esta regla no se aplica y puede llevar a errores. La mejor medida de la profundidad para estas olas es el número de Froude basado en la profundidad mostrada en la formula 3

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

donde V es la velocidad del buque, g es la gravedad, y h la profundidad del agua. Cuando el cociente entre la profundidad y la eslora en la flotación es mayor que uno, se puede considerar que la profundidad no afecta a la formación de olas. El número de Froude basado en la profundidad resulta crítico en la determinación las características de las olas en aguas poco profundas, al igual que el número de Froude basado en la eslora (F_n) lo es en aguas profundas. Sin embargo, la influencia de F_{nh} es mucho más visible que la de F_n . El valor crítico de F_{nh} es uno. Los valores inferiores a uno se llaman subcríticos y los superiores a uno, supercríticos. Para valores subcríticos de F_{nh} y para valores del número de Froude inferiores a 0.9, tenemos el patrón de olas de Kelvin clásico, como se muestra en la figura 1

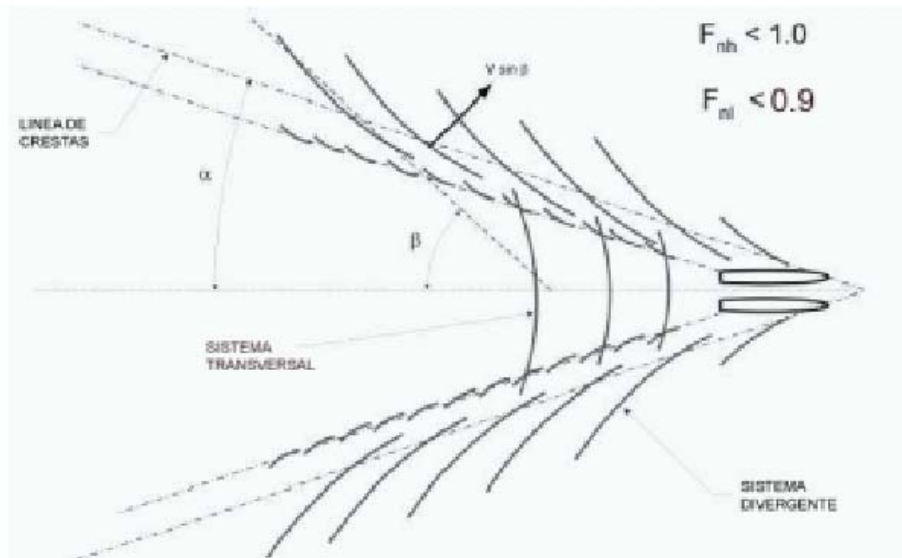


Figura 1: patrón de olas de Lord Kelvin en régimen subcrítico

Si un buque pasa de aguas profundas a poco profundas navegando a velocidad constante, a F_n inferiores a 0.9, la dirección de propagación de olas cambia (figura 2) y se produce un bloqueo en la generación de olas que hace que la resistencia por formación de olas crezca de un modo importante. El fenómeno es similar al que se produce cuando un avión alcanza la velocidad del sonido. Para un buque que viaje a 18 nudos, esto se producirá para profundidades inferiores a 8.5 metros.

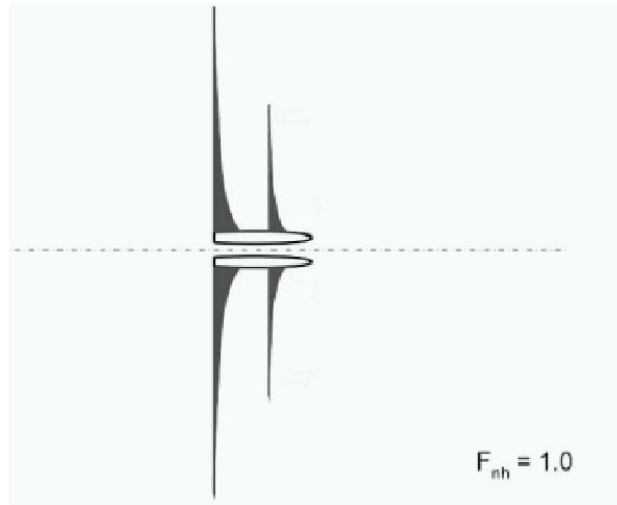


Figura 2: bloqueo del tren de olas divergente

En estas condiciones, para buques navegando a un número de Froude mayor o igual que la unidad, el tren de olas será el que aparece en la figura 3, en la cual no se produce el fenómeno de bloqueo, pero ha desaparecido el tren de olas transversal. Podemos observar también fotografías reales correspondientes a este tren de olas supercrítico comparado con el subcrítico en las figuras 4 y 5.

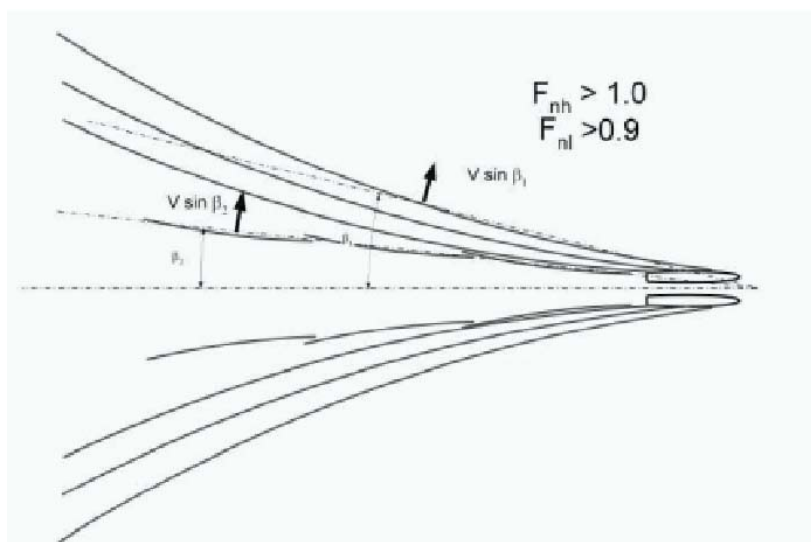


Figura 3: Desaparición de las olas transversales por un $F_{nh} > 1$

Este tipo de consideraciones son importantes para entender cómo son las olas generadas por este tipo de buques. En la figura 5 es posible observar también las diferencias entre las olas generadas por un buque navegando en régimen subcrítico y otras correspondientes a ese mismo buque navegando en régimen supercrítico. Estas no se refieren únicamente al aspecto del tren de olas, sino también a las características de cada una de las componentes elementales de ese tren de olas.



Figura 4: Tren de olas supercrítico

Resulta fácil observar que la longitud de las olas generadas por el buque navegando a alta velocidad es mucho más grande que la longitud de las olas correspondientes al buque "lento". En la figura 6 podemos observar las distintas zonas de las que consta el registro correspondiente a un corte longitudinal del tren de olas del buque navegando en régimen supercrítico. Estas olas divergentes (es el único tren que se mantiene, como ya hemos dicho) se caracterizan por grupos de olas de periodos cortos y largos. Como podemos observar en dicha figura, hay tres grupos de olas si atendemos al periodo. El primer grupo es típico de los buques rápidos y consiste en olas de gran periodo, que sufren muy poca dispersión al alejarse del barco, y transportan toda su energía hasta la orilla. Ello se debe a que viajan muy rápido, más rápido que los otros trenes.



Figura 5: Embarcaciones navegando en régimen subcrítico y supercrítico

El segundo grupo de olas también hubiese aparecido en el corte longitudinal del sistema divergente de un buque convencional, mientras que el tercero es también típico de buques rápidos, y es muy peligroso por estar formado por olas de gran

pendiente, que inducen momentos escorantes importantes, y pueden afectar a la navegación de pequeñas embarcaciones que estén en la zona de paso.

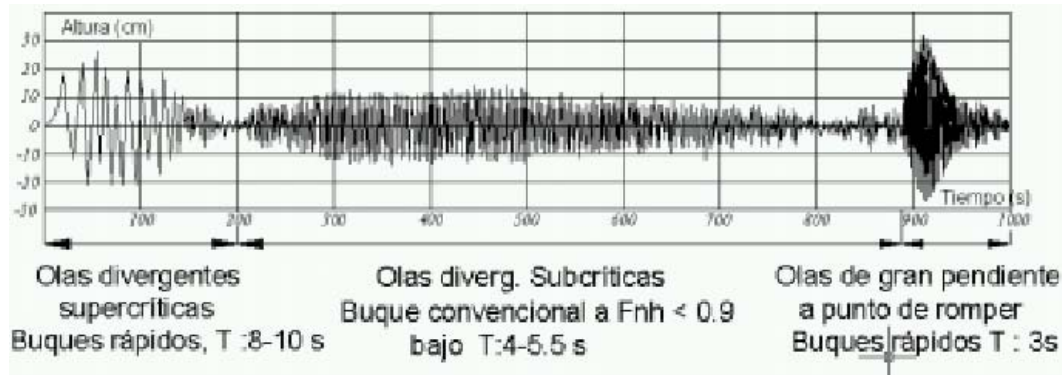


Figura 6: relación entre el periodo y la altura de la ola

Una vez conocido el tipo de fenómeno físico al que nos enfrentamos, podemos hacer un análisis de los condicionantes que se les exige a este tipo de buques para navegar en ciertas áreas, con objeto de evitar los perjuicios que provocan las olas producidas por los mismos.

1.4 El método de Michell

Mucho tiempo y recursos sean destinados a desarrollar métodos que calculen especialmente la resistencia producida por la formación de olas y su posterior verificación experimental. Uno de los métodos consiste en determinar los flujos alrededor del casco a través de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes y su respectiva distribución de presiones normales al casco, para posteriormente integrar numéricamente las componentes de proa a popa de estas presiones sobre el casco generando la resultante que representa la resistencia al avance.

Con otras simplificaciones, el método del casco fino o esbelto fue desarrollado por el australiano J. Michell en 1898, para cascos moviéndose en una superficie libre en un fluido sin viscosidad. La principal característica de este método es que la superficie del casco es representada en 2 dimensiones en un plano imaginario en la línea de crujía del casco. En otras palabras si un casco de un buque es descrito por una serie de puntos con coordenadas (X,Y,Z) . Michell toma los puntos tridimensionales y la coordenada Y como una función de (X,Z) logrando una

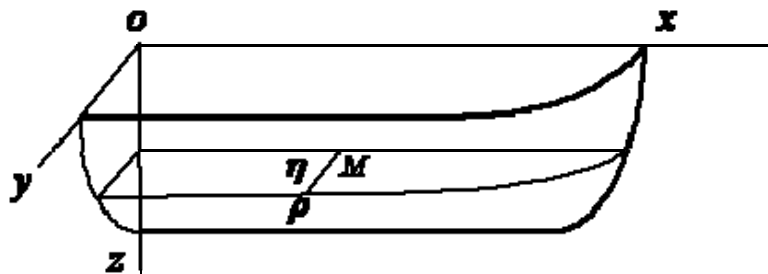


Figura 7: Casco representado en coordenadas (X,Y,Z)

representación plana del casco a evaluar. Debido a esta simplificación es que el método lleva su nombre de buque fino o esbelto ya que la simplificación es válida solo para casos donde la relación eslora/manga es alta y es cada vez menos exacto para cascos con una reducida relación. En esta representación plana antes nombrada se deducen las presiones que surgen alrededor del casco y que son las responsables de generar las olas cuando la embarcación se mueve en este caso en el eje X de la figura 7. Al integrar las componentes de las presiones de proa a popa en expresiones que finalmente se traducen en la resistencia total por formación de olas.

El pionero en trabajar en el método de Michell y quien además se encargo de rescatarlo de la oscuridad fue Havelock en 1955, quien propuso a partir de una de las formulaciones de Michell un calculo mas exacto de la resistencia al avance. Pero en términos generales la formulación logra describir la elevación de las olas y su patrón a una gran distancia del la popa del buque, basado esto la resistencia por formación de olas es igual a la energía que cuesta mantener el sistema de olas generado por el buque deduciendo de esta manera la resistencia al avance.

La teoría desarrollada por Michell era valida solamente si se asumían las siguientes restricciones y simplificaciones:

- a) El fluido no tiene viscosidad y es irrotacional.
- b) El casco debe ser angosto respecto a su longitud, es decir un buque fino
- c) La altura de las olas generadas por el buque son pequeñas comparadas con su longitud.
- d) El buque no experimentara trimado dinámico

Las condiciones de contorno que deben ser satisfechas por el potencial de velocidad son:

- a) La presión en la superficie libre debe ser constante e igual a la atmosférica
- b) En todos los puntos sobre la superficie del casco la velocidad normal relativa al casco debe ser cero

Para poder lograr que el problema fuera abordable con los métodos matemáticos existentes estos debían ser integrados numéricamente con muy baja precisión pero actualmente este método fue programado y hecho un programa de licencia liberada que ya tiene su octava versión y que se revisara en detalle en el punto 2.2. Pero en general la gran ventaja de este método sobre otros como códigos RANSE o el método potencial de los paneles, es la velocidad con la que funcionan sus programaciones, gracias a sus simplificaciones, pero sin duda es un método que conlleva una baja precisión en sus resultados.

1.5 Consideraciones en un multicasco

Las embarcaciones con más de un casco tienen un origen en la polinesia, donde grupos de nómadas transitaban entre las distintas islas de los archipiélagos. Estas embarcaciones tenían como principal característica la de poseer un casco extremadamente fino que no tenía estabilidad positiva por sí mismo, para que la embarcación fuera estable y fuera posible navegar en ella se le anexaba un segundo casco mas pequeño que entregaba la estabilidad requerida. Los antecedentes históricos muestran que algunas embarcaciones pertenecientes a los jefes de las tribus alcanzaban dimensiones de más de 15m (figura 8).



Figura 8: antiguo catamarán polinesio

El concepto del multicasco fue descartado por mucho tiempo por la arquitectura naval tradicional que estaba acostumbrada a los monocascos, no fue sino hasta después de la segunda guerra mundial que el concepto fue rescatado e introducido como una alternativa viable de diseño. Los pioneros en el tema fueron los Arquitectos navales de Hawai que retomaron el concepto básico de las tribus polinesias y lo aplicaron a embarcaciones de turismo y de recreo. Los que continuaron el desarrollo de los multicascos fue la industria naval australiana que hoy es líder en el diseño de este tipo de embarcaciones.

1.5.1 Los multicascos actuales

En la actualidad podemos encontrar multicascos de 2, 3, 4 y hasta cinco cascos siendo los dos primeros casos los más comunes. Para este trabajo es de relevancia la configuración de 2 cascos llamadas comúnmente como catamarán. En este grupo podemos distinguir los catamaranes de desplazamiento, los de semi-desplazamiento y los de planeo. Entre las principales ventajas de tener dos cascos relativamente esbeltos separados entre sí, es la gran área de cubierta utilizable combinada con una excelente estabilidad transversal producto de su elevada altura metacéntrica lo que los hacen ideales para el turismo y pasaje.

1.5.2 Parámetros que afectan en la resistencia al avance de un catamarán

La resistencia al avance es afectada mayormente por la relación de superficie mojada ($S/vol^{2/3}$), la relación de esbeltez ($L/vol^{1/3}$) y la relación de espaciado entre ambos cascos (separación/ L). Comparado con un monocasco del mismo desplazamiento, la relación de superficie mojada es relativamente alta lo que consecuentemente produce que los catamaranes tengan un pobre desempeño a velocidades bajas de $Fn < 0.35$ que es donde la resistencia de fricción predomina. A mayores velocidades de Fn de 0.5 los menores trimados dinámicos producto de la mayor esbeltez de los cascos hacen que tenga un rendimiento superior. De la misma manera al llegar Fn mas altos el rendimiento del catamarán se muestra mejor comparado con monocascos de planeo pero solo en el rango en que el monocasco esta en su condición de semiplaneo.

1.5.3 Espaciamiento entre ambos cascos

La relación entre el espaciamiento y la longitud de los cascos es de vital importancia ya que esto influye directamente en la interferencia y superposición de de los sistemas de olas generados por cada casco del catamarán, además de la interferencia dinámica del flujo en un casco producto de la presencia del otro casco. Diversos estudios han demostrado que cierto tipo de espaciamiento suele ser crítico debido a los campos de velocidades que se producen entre ambos cascos, en muchos casos se ha investigado la utilización de casco asimétricos y con una disposición longitudinal asimétrica que ha demostrado ser beneficiosa por el efecto dinámico que se produce.

Por lo anterior este es uno de los principales aspecto que se buscara optimizar en este trabajo persiguiendo como principal objetivo la reducción de la resistencia al avance y en consecuencia la elevación de las olas producidas.

1.5.4 Consideraciones para reducir el wake wash en un catamarán

Si bien existen varios parámetros que se pueden optimizar para lograr reducir el wake wash en un catamarán dos resaltan como los que se debe poner mayor atención (Stumbo et al, 2002). El primero es la relación L/B de cada casco que compone el catamarán. Cuanto mas alto sea este valor mas fino serán los cascos lo que contribuye a minimizar el wake wash, pero esto no es gratis, al afinar los cascos manteniendo el desplazamiento se debe aumentar el calado (ver figura 8) lo que a la vez aumenta la superficie mojada lo que incide directamente en la

resistencia al avance. Pero es una práctica común en la industria naval, donde se sacrifica la resistencia.

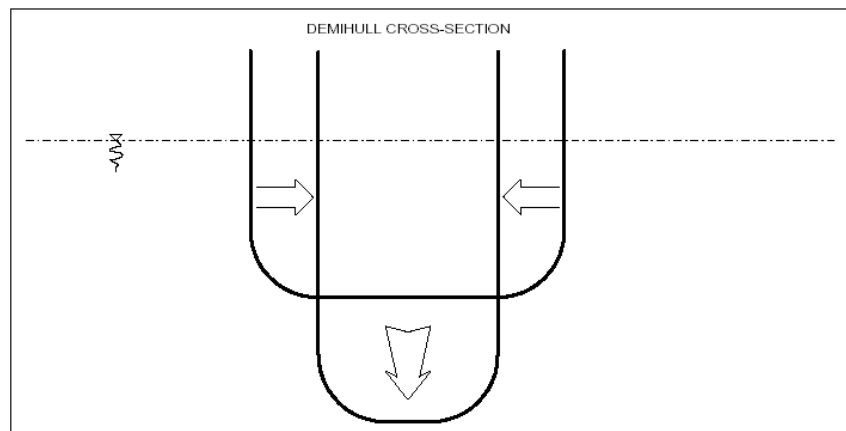


Figura 9: aumento del calado al estrechar la manga de la sección maestra

El segundo aspecto, que ya ha sido nombrado, es el espaciamiento entre ambos casco, responsable de la superposición de olas y de las posibles aceleraciones de flujo entre ambos cascos por lo cual este será otro parámetro a optimizar.

1.6 Definición de la embarcación base

Para que este trabajo no fuera solo un ejercicio académico y se pudieran acotar ciertos valores como desplazamiento y velocidad de operación, se decidió utilizar un diseño base ya existente y que se encuentra actualmente en operación como catamarán turístico en las vías fluviales de la provincia de Valdivia, ciudad ubicada a 840Km al sur de Santiago de Chile.

El diseño de este catamarán fue realizado en el año 1994 y tenía estimado un desplazamiento de diseño de 67.34 toneladas, pero al parecer se incorporaron pesos no previstos inicialmente por lo cual actualmente desplaza 90 toneladas. Como consecuencia su desempeño no es eficiente, especialmente en cuanto a la generación de olas ya que el sistema de olas que produce es relativamente alto. Del diseño original se conservará como base para la optimización su eslora, su desplazamiento y su velocidad de operación de 8Kn ($F_n 0.3$).



Figura 10: Catamarán Marques de Mancera usado como embarcación base.

Capítulo 2: Investigación empírica

2.1 Modelación de los cascos

Para modelar la carena del diseño base se utilizó el programa Freeship 2.6 de licencia liberada. Este programa desarrollado por la Universidad de Delft, ubicada en Holanda, es ideal para el posterior ingreso de datos al programa Michlet 8.0, ya que genera un archivo exportable de las formas del casco en una detallada tabla de puntos, a la vez el módulo de optimización del programa entrega un archivo compatible con este programa del casco optimizado y del patrón de olas obtenido. La Formulación matemática que tiene Freeship 2.6 para representar superficies continuas se basa en una subdivisión de superficies más pequeñas, este método fue desarrollado por Scout Schaeffer y Joe Warren (2004). Este esquema utiliza híbridos cuadrados y triangulares como polígono de control con un resguardador de continuidad llamado C^2 . Normalmente los programas de modelación trabajan con superficies splines paramétricas como superficies B-splines o superficies NURBS. Estas superficies son totalmente descritas por un set de puntos de control de manera muy similar a las NURBS. Estos son los puntos que el usuario puede utilizar para modificar las formas de la superficie. Cada punto en la superficie es directamente calculado por estos puntos de control usando una serie de fórmulas paramétricas. Estos puntos de control requieren una topología rectangular de M por N , como la que muestra la figura 11.

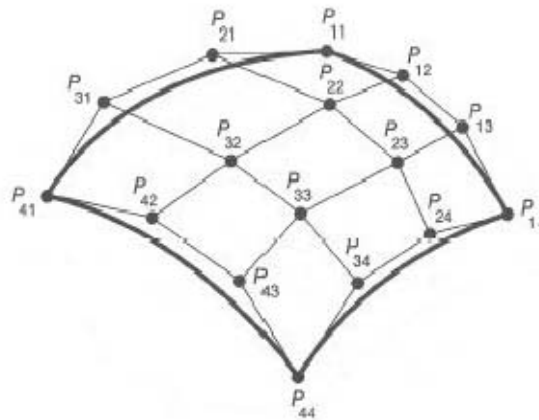


Figura 11: malla de control de la superficie

La mayor garantía que entrega este programa, es que se pueden modelar diversas y complicadas formas sin un requerimiento informático elevado y lo mejor es que presenta licencia liberada.

2.1.1 Introducción del casco base

Una de las primeras tareas fue obtener el plano de líneas original de la embarcación base, el que estaba en papel en un formato A0 (figura 12).

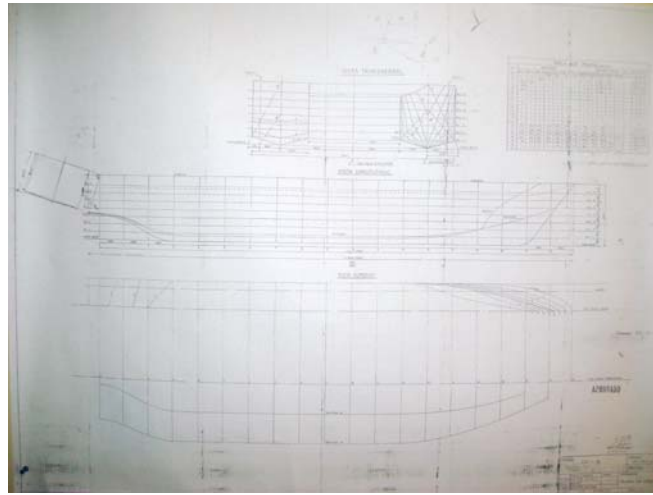


Figura 12: plano de formas de la embarcación base en papel

Este se digitalizo y se coloco como fondo en cada vista correspondiente en el programa Freeship 2.6 gracias a una herramienta especial que tiene el programa que escala la imagen la magnitud de representación del programa. Posterior a esto se hizo una verificación con la tabla de puntos que se encontraba en el plano para corregir posibles deformaciones producto del traspaso de formatos, de esta manera se obtuvo el modelo digital.

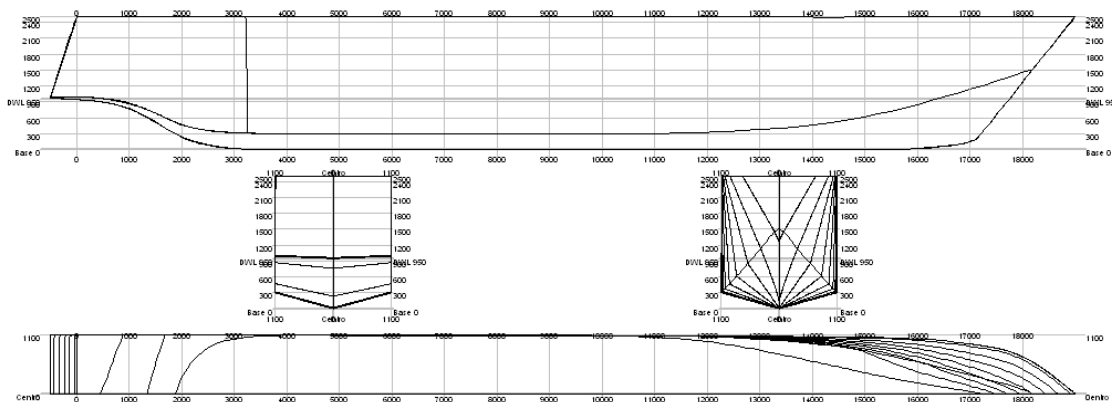


Figura 13: plano obtenido en programa Freeship 2.6

2.2 El programa Michlet 8.0

Basado en la solución matemática propuesta por J. Michell para describir la resistencia al avance por formación de olas para cascos finos, Leo Lazauskas, investigador del departamento de matemáticas aplicadas de la Universidad de Adelaida, desarrollo el programa michlet junto con otros investigadores,

especialmente para realizar trabajos académicos (Tuck et al,1998, 1999, 2000 y 2002).

El programa tiene licencia liberada, pero sus derechos son reservados, como una manera de incentivar la investigación. A continuación se realizara una descripción general del programa.

2.2.1 Cálculo de Resistencia al Avance

Para el cálculo de la resistencia al avance, Michlet desglosa la resistencia en componentes, calculándolas por separado. La resistencia por formación de olas se estima empleando la Teoría del Buque Esbelto de Michell completada con (entre otros) los efectos del espejo de popa y el desplazamiento del espesor de la capa límite.

Para monocascos y para cada uno de los cascos que forma un multicasco:

- . “ R_h ” - Resistencia hidrodinámica debida al espejo de popa.
- . “ R_f ” – Resistencia por fricción.
- . “ R_{wtrans} ” – Resistencia por formación de olas transversales.
- . “ R_{wdiv} ” – Resistencia por formación de olas divergentes.
- . “ $R_w = R_{wtrans} + R_{wdiv}$ ”
- . “ $R_{form} = Resistencia\ viscosa\ R_f \cdot k$ ”
- . “ k ” = factor de forma.
- . “ R_t ” = Resistencia total
- . “ R_r ” = Resistencia residual.

En el caso que el número de Froude basado en la profundidad sea supercrítico, R_{wtrans} es siempre igual a cero, dado que no hay olas transversales. Además de las componentes definidas arriba, Michlet también calcula las siguientes interferencias:

- . “ $R_{wtinter}$ ” = Variación de la resistencia por interferencia de los sistemas de olas transversales.
- . “ $R_{wdinter}$ ” = Variación de la resistencia por interferencia de los sistemas de olas divergentes.
- . “ R_{inter} ” = Variación de la resistencia por formación de olas por interferencia de los sistemas de olas
- . $R_{inter} = R_{wtinter} + R_{dinter}$

Para los valores de interferencia, los valores positivos significan una interferencia perjudicial (la resistencia por formación de olas aumenta), mientras que los valores negativos significan una interferencia beneficiosa en la que se produce cancelación de los sistemas de olas (la resistencia por formación de olas decrece).

2.2.3 Cálculo de elevación de olas

El patrón (o la elevación) de las olas puede calcularse sobre dos dominios de formas diferentes. El **parche sectorial** requiere cinco parámetros para definirla. R_0 y R_1 (números decimales mayores de 0.0) determinan los límites radiales del parche dentro del cual se calcula el patrón de olas.

El valor B determina la extensión angular del parche. El número de nudos radiales, N_R , y el número de nudos angulares, N , (ambos números enteros entre 2 y 200) determinan la fineza de la malla para el cálculo del patrón de olas. Un valor de 100 para ambos dará una precisión adecuada en un tiempo de cálculo razonable.

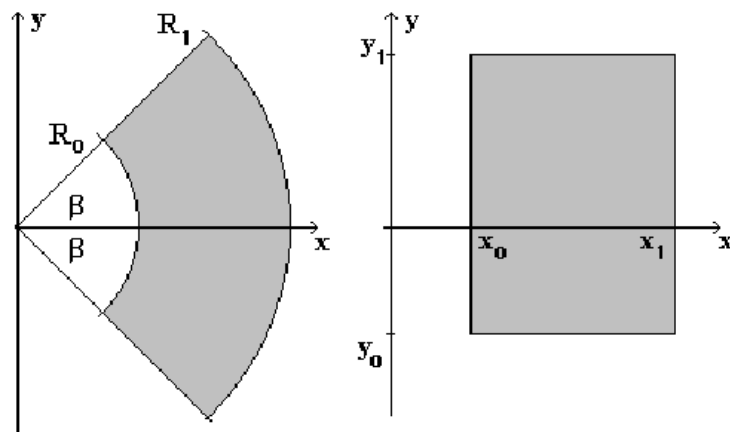


Figura 14: parche sectorial y parche rectangular

El cálculo del patrón de olas puede requerir bastante tiempo de cálculo. Es mejor calcular primero el patrón de olas con una malla gruesa (valores pequeños de N_R y N) antes de que se esté satisfecho con la posición del parche y la relación de aspecto del gráfico. El número de puntos que definen la malla puede cambiarse en la pantalla mientras Michlet se encuentra calculando.

El **parche rectangular** requiere seis parámetros para definirlo: x_0 , x_1 , y_0 , y_1 , N_x y N_y . El origen de coordenadas sigue siendo el punto medio del casco número 1. x_0 y x_1 determinan los límites longitudinales del parche, y_0 y y_1 determinan los límites transversales, y finalmente, N_x y N_y determinan el número de filas y columnas de nudos dentro del parche, de forma que la malla estará compuesta por $N_x \times N_y$ nudos.

La estimación de la altura de ola en las zonas próximas al buque no es precisa por lo cual el parche donde se calcule el patrón de olas no debe estar más cerca que una eslora hacia popa del extremo popel del buque. En algunos casos puede ser incluso mejor usar una longitud de onda hacia popa del

buque. En aguas profundas, la longitud de onda de las olas viene dada por la formula 2:

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot V^2 / g \quad (2)$$

En aguas poco profundas el cálculo de la longitud de onda es más complejo. También cuando el parche se sitúa a una distancia muy alejada del buque se necesitará un valor de malla (N_{θ}) mayor. Es casi obligatorio primero realizar varias pruebas con distintos valores de N_{θ} para ver cual es el valor que proporciona una adecuada precisión para cada aplicación particular. Además el programa es capaz de realizar cortes transversales y longitudinales de las áreas calculadas. Esto posibilita una evaluación más acuciosa sobre las alturas de las olas generadas por la embarcación.

2.3 Optimización por algoritmos genéticos y estrategias evolutivas

Optimizar los aspectos hidrodinámicos de una embarcación, depende de varias características, se hace muy difícil definir los parámetros a variar para lograr esa optimización, y qué consecuencias traerá la optimización de la resistencia en otros aspectos. Este problema se ha enfrentado tradicionalmente variando sistemáticamente algún parámetro adimensional tales como coeficiente prismático, de block, relación eslora-manga, y otras características que pudieran definir una tendencia hacia la optimización buscada. Este procedimiento ha sido el origen de las series sistemáticas, involucrando un enorme trabajo experimental, para lo cual es necesario construir una gran cantidad de modelos a escala para realizar los ensayos en canales de prueba.

En este trabajo, el proceso de optimización se realiza a través de algoritmos genéticos (Lowe 2004, Doctors 2000) con una estrategia de selección evolutiva. Esta técnica es utilizada para un sin número de problemas de ingeniería que buscan optimizar algún aspecto en el proceso de proyecto, el cual depende de complicadas funciones que involucran muchas variables.

Aplicado al problema de resistencia el algoritmo utiliza el mismo principio de selección natural que definió Darwin con su teoría evolucionista. A partir de un casco inicial o padre, el algoritmo genera una población de nuevos cascos que han heredado las principales características del casco padre pero que han mutado otras, inmediatamente con un evaluador, en este caso el programa Michlet 8.0 (Tuck et al, 1998, 1999, 2000 y 2002) basado en el método de casco esbelto de Michell (1898), donde se evalúan los parámetros, como elevación de ola generada

por cada casco, siendo este un aspecto que interesa en este trabajo. El proceso evolutivo elimina los cascos más débiles en el aspecto a optimizar dejando al más fuerte u óptimo para que genere una nueva generación de cascos. Evidentemente se deben poner ciertas restricciones a las mutaciones para que no se generen cascos inútiles. Entre las restricciones más lógicas para un casco están las de desplazamiento, que puede fijarse en el valor original. También es importante tener en cuenta valores máximos de eslora, manga y calado. Para monocascos es relevante limitar la altura metacéntrica mínima, que asegure que la embarcación sea estable. Si algún casco generado viola alguna de estas restricciones, el algoritmo lo descarta inmediatamente.

2.3.1 Modulo optimizador GODZILLA

El algoritmo genético que se utiliza en este trabajo es el programado por Leo Lazauskas y que debe su nombre a las iniciales en inglés de *Genetic Optimisation and Design of Zoomorphs Is Leo Lazauskas's Acronym*(GODZILLA)(Lazauskas 2000). Este es un modulo que está directamente enlazado con el programa Michlet 8.0, entre sus debilidades se encuentra que no es posible evaluar embarcaciones con trimado.

GODZILLA es capaz de generar extensas iteraciones y en cada una puede generar poblaciones de entre 3 a 120 sujetos. No existe forma de determinar el tamaño óptimo de población a utilizar, pero es sabido que poblaciones muy pequeñas pueden quedar atrapadas en un mínimo local que es sub óptimo. Además durante el progreso del proceso de optimización con poblaciones pequeñas, cada sujeto se vuelve muy parecido a los demás que dificulta al algoritmo para generar nuevas configuraciones de sujetos. Por otro lado poblaciones muy grandes toman una gran cantidad de tiempo de cálculo pero son necesarias para lograr soluciones óptimas, un buen ejemplo de esto es el caso de los multicascos que involucran más parámetros en la optimización.

2.3.2 Función controladora de formas del casco

Las formas de un buque son representadas a través de un programa que genera una superficie, la que es gobernada por una malla de control, un ejemplo de esto son los programas de modelación NURBS, la mayoría de estos programas tienen herramientas que permiten escalar las superficies independientemente en cada dirección de los ejes o realizar transformaciones paramétricas. Es decir, es posible cambiar aspectos del casco automáticamente.

Para ahorrar recursos informáticos el módulo optimizador utiliza otra manera de representar un casco y está basado en series matemáticas que representan las formas del casco a partir de 8 parámetros, a saber:

F_0 = Forma de las líneas de agua del cuerpo de proa (0.0 – 3.0)

F_1 = Forma de las secciones transversales (0.0 – 3.0)

F_2 = Forma del perfil longitudinal del cuerpo de proa (0.0 – 3.0)

F_3 = Forma de las líneas de agua del cuerpo de popa (0.0 – 3.0)

F_4 = Forma del perfil longitudinal del cuerpo de popa (0.0 – 3.0)

F_5 = % sobre la eslora total de la eslora del cuerpo de proa (0.0 – 1.0)

F_6 = % sobre la eslora total de la eslora del cuerpo de popa (0.0 – 1.0)

Los tres primeros parámetros (F_0 , F_1 , F_2) afectan a la forma de las líneas de agua, de las secciones transversales y del perfil longitudinal, respectivamente. Todos tienen valores entre 0.0 y 3.0 (ambos inclusive, ver figura 15). Pero que afectaran solo al cuerpo de proa. La serie funciona de forma tal que si el parámetro correspondiente toma el valor 0.0, la forma será rectangular, si toma 1.5 la forma será elíptica y si toma 3.0, parabólica. Valores intermedios producirán formas intermedias entre las mencionadas.

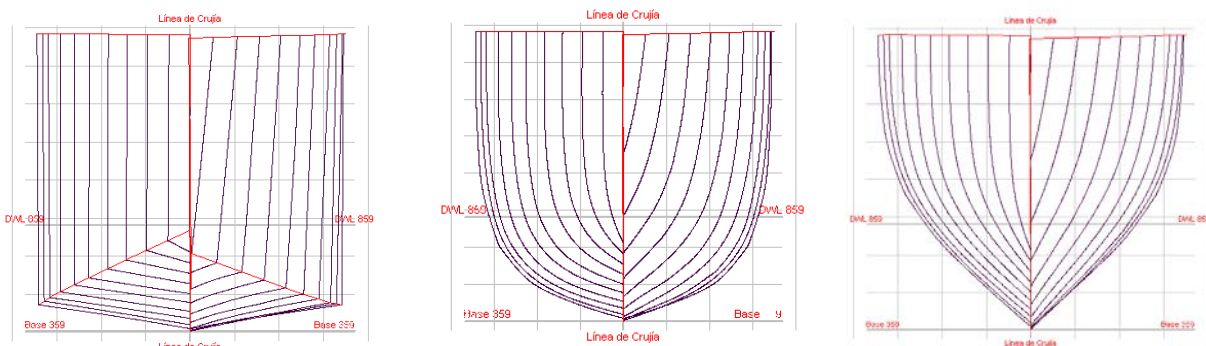


Figura 15: Secciones transversales con F_1 de 0.0, 1.5 y 3.0 respectivamente.

Los siguientes dos parámetros F_3 y F_4 son para el cuerpo de popa. No se requiere un parámetro para las secciones transversales del cuerpo de popa porque la forma de los dos cuerpos debe ser la misma para conseguir una correcta transición. Los dos últimos parámetros especifican la longitud relativa de los cuerpos de proa y popa. Si la suma de ambos es menor que 1, ambos cuerpos se unirán por medio de un cuerpo cilíndrico de longitud igual a $1 - F_5 + F_6$. Debe notarse que la suma es mayor a 1, no habrá cuerpo cilíndrico y la longitud del cuerpo de popa será reducida hasta que la suma sea igual a 1.

Un octavo parámetro controla la forma del espejo y es llamado:

F_7 = "Relación de cambio" del cuerpo de popa.

Este parámetro controla las secciones transversales del cuerpo de popa. Si $F_7 = 0$ el cuerpo de popa termina con su última sección con todas las semimangas a cero. Si $F_7 = 1$, el cuerpo de popa terminará en una popa de espejo con la misma forma que el cuerpo cilíndrico (o unión del cuerpo de popa y de proa). Valores intermedios crearán un espejo con un área menor al correspondiente al parámetro 1.0.

Variar los 8 parámetros antes descritos resulta más sencillo para el algoritmo que ir variando una malla de control de una superficie. Esto resulta muy cómodo en un proceso de optimización ya que la forma matemática se adapta para lograr el volumen requerido a partir de la eslora, manga y calado introducido en la misma.

2.3.3 Edición de la planilla de optimización

Para usar el módulo optimizador primero se debe editar un archivo de texto que defina propiedades del agua y del aire, los parámetros de cálculo como número y rango de velocidad a optimizar, definición de la densidad del mallado de integración de las olas, número de cascos involucrados y otros. A la vez se pueden restringir las dimensiones máximas y mínimas (eslora, manga y calado), separación mínima y máxima entre cascos, tanto transversal como longitudinal para catamaranes y otros multicascos. El volumen desplazado o su rango es posible definirlo al igual que el resto de variables antes mencionadas. Sin duda uno de los aspectos más interesantes es que una vez definida la serie matemática que se utilizará, esta puede ser editada para definir los rangos que describen la forma. Por ejemplo si se quiere obtener secciones transversales rectangulares en el casco se elegirá un rango de iteración entre 0 y 0.1 que permita una fácil construcción en acero o en el caso del perfil longitudinal de popa dejarlo en un rango de 2.8 y 3 para formas más elípticas que permitan colocar un propulsor convencional. Esta cualidad permite definir ciertos aspectos deseables en el diseño final son intransables, ya que no tiene sentido generar un casco óptimo hidrodinámicamente pero que tenga características de diseño que le impidan ser práctico.

2.4 Estrategia para la optimización

El programa permite realizar la optimización una vez que se han fijado ciertos parámetros pero se prefirió realizar un sondeo probando varias alternativas y configuraciones de limitaciones que afectan directamente a las dimensiones principales de la embarcación, como restringir también el rango permitido para las funciones que rigen las formas de los cascos comentadas anteriormente. Además

el casco o los cascos pueden ser optimizados para una velocidad de operación específica o para un rango de velocidades. Cuando se desea especificar el rango de velocidades se debe primero seleccionar velocidades representativas de este rango y asignarle un valor de importancia porcentual, es decir, si se quiere optimizar una embarcación en el rango de los 8 a los 12 nudos se le debe indicar al programa que cada una de esas velocidades tiene un 50% de importancia, si se quiere afinar aun más es posible establecer velocidades intermedias, aplicado al ejemplo anterior sería 10 nudos y cada velocidad tendría un peso en la optimización de un 33,3%.

En este trabajo se decidió realizar un sondeo aplicado a tres velocidades que considera el rango de operación de este catamarán iniciando en 8 nudos, que es la velocidad actual de operación de la embarcación base, a los 12 nudos que sería una buena velocidad de operación potencial, y que sobrepasa el nivel desarrollado actualmente. Para esto se fijaron las velocidades de 8, 10 y 12 nudos, realizando un análisis independiente para cada una de estas velocidades, a cada una se le asignó un peso de 100%, además de esto, en cada ocasión se varió el rango de los parámetros de las funciones que dominan el casco y los rangos de manga máxima y mínima de cada casco del catamarán como el espaciamiento lateral entre cascos. Esto se hizo con el fin de ampliar las opciones que puede tomar el algoritmo, evitando la generación de poblaciones subóptimas.

2.4.1 Verificación de la malla de integración

Antes de comenzar el proceso de iteración automática del algoritmo genético, para cada velocidad seleccionada se realizó un experimento a fin de garantizar resultados satisfactorios de la altura de ola generada con la menor densidad de malla posible, ya que esto ahorra considerable tiempo de procesamiento. Para esto se varió sistemáticamente la densidad de la malla y se utilizó un casco matemático de 7 parámetros para simplificar el experimento, además se fijó un máximo de 20.000 iteraciones de optimización y se especificó solo una velocidad de optimización.

Se comenzó con una malla de 110X110 y se fue aumentando sistemáticamente a 220X220, 320X320, 520X520 y finalmente 640X640.

El experimento demostró que los resultados convergían a partir de una densidad de malla de 320X320, como es posible apreciar en la figura 16, la que fue adoptada finalmente para las fases siguientes.

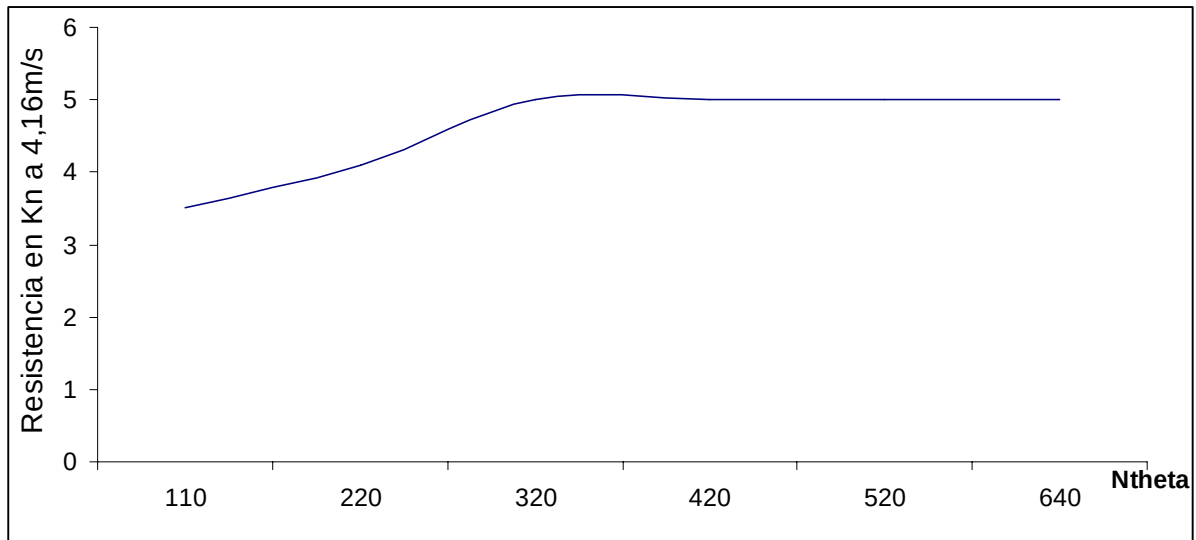


Figura 16: Convergencia de la malla de integración

2.4.2 Consideraciones iniciales

Como punto de partida, se limitaron ciertos aspectos básicos de diseño que definieron las características de la embarcación, según lo siguiente:

- Eslora máxima: 20m (cada casco)
- Volumen desplazado: 45m^3 (cada casco)
- Manga máxima de toda la embarcación: 12m

El número máximo de iteraciones permitido, se fijó en 50.000, si bien los resultados convergían a partir de 25.000 iteraciones en algunos casos, otros lo hacían a 30.000 o 35.000 iteraciones, de tal modo al realizar 50.000 iteraciones se estaría en un rango de certeza de convergencia.

2.4.3 Tendencias y resultados obtenidos

Las tendencias que tomaron las optimizaciones, con cada una de las variaciones realizadas en los rangos de los parámetros que rigen al casco matemático y en las dimensiones generales, tanto de la embarcación como del casco simétrico que compone el catamarán se muestran en la siguiente tabla resumen. La tabla N°1 a la vez muestra las dimensiones del casco optimizado para cada caso, resultado hidrodinámico a la resistencia al avance y la altura de formación de ola.

Rango de funciones		F8a	F8b	F8c	F10a	F10b	F10c	F12a	F12b	F12c	F8-12
f0		0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0
f1		0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0
f2		0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1
f3		0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0
f4		1,5-3,0	2,5-3,0	2,9-3,0	2,5-3,0	2,8-3,0	2,9-3,0	2,5-3,0	2,8-3,0	2,9-3,0	2,9-3,0
f5		0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75
f6		0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75
f7		0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75	0-0,75
Rango de dimensiones de la embarcación											
Eslora	m	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20
WOA	m	5 a 10	5 a 10	5 a 10	7a 12	8 a 12	7 a 12	5 a 12	7 a 12	7 a 12	7 a 12
Volumen	m³	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90	90 a 90
Rango de dimensiones de cada casco											
L	m	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20	19 a 20
B	m	0 a 2,5	0 a 2,8	0 a 4	0 a 2,5	0 a 2,5	0 a 2,5	0 a 2,5	0 a 2,5	0 a 2,5	0 a 2,5
T	m	0 a 1,6	0 a 1,6	0 a 1,6	0 a 1,6	0 a 1,6	0 a 1,6	0 a 1,8	0 a 1,8	0 a 1,6	0 a 1,6
Volumen	m³	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45	45 a 45
Dimensiones obtenidas de cada casco optimizado											
L	m	19,8	19,7	19,7	20,0	20,0	20,0	19,8	19,9	19,9	20,0
B	m	2,5	2,8	3,4	2,13	2,57	2,20	1,63	1,68	1,80	2,06
T	m	1,56	1,58	1,40	1,60	1,50	1,57	1,70	1,65	1,57	1,57
WOA	m	9,81	8,50	8,87	7,10	8,00	7,17	5,60	7,00	7,00	9,90
CB		0,58	0,52	0,48	0,66	0,58	0,65	0,82	0,82	0,80	0,70
Resultados obtenidos											
Resistencia total a 8 Kn	KN	5,17	3,97	3,71	8,86	9,35	8,85	20,10	32,00	34,00	44,00
Altura de ola	m	0,138	0,101	0,083	0,276	0,306	0,287	0,54	0,55	0,60	0,60

Tabla 1: Resumen de las características de los modelos optimizados

2.4.3.1 Optimización para una velocidad de 8 nudos

Se realizaron varios ensayos de optimización para poder tener una clara visión de la tendencia que debían llevar los parámetros de diseño para lograr ventajas significativas. El primer proceso de optimización mostró resultados muy favorables en comparación con la evaluación del modelo original, tanto en elevación de ola como en resistencia al avance. En cuanto a la elevación de ola esta se disminuyó de 0.998 metros de altura máxima a solo 0.138 metros para en optimización F8a(figura 17). Este resultado era esperable debido a las grandes diferencias observadas en la embarcación base que no está diseñada para esta velocidad, la razón para esto basada en los datos que entrega el método numérico es la interacción negativa que existe entre los cascos de la embarcación base que tiene un punto máximo a la velocidad de 8 nudos, de manera inversa los tres diseños optimizados mostraron una interacción positiva a esta velocidad lo que generaba un mínimo que no solo reducía la altura de la ola si no también y por lógica la resistencia al avance generadas por las mismas.

La primera tendencia que fue posible apreciar en el primer diseño optimizado fue que se utilizó el valor máximo de manga para cada casco que tenia un rango de 0

a 2,5 metros, por lo cual en las optimizaciones subsecuentes se amplió este rango hasta 2.8 metros, donde el modelo óptimo también ocupó el máximo. Finalmente se extendió el rango hasta 4 metros donde el casco óptimo quedó con una manga de 3,4 metros obteniendo resultados superiores.

Otro de los parámetros que se varió fue el rango de la función f4, que domina la forma del perfil longitudinal a popa del casco matemático que inicialmente tenía un rango de 2,5 a 3,0 y terminó con 2,9 a 3,0 lo que obligaba a generar una popa que pudiera acomodar un propulsor y reducir la resistencia viscosa.

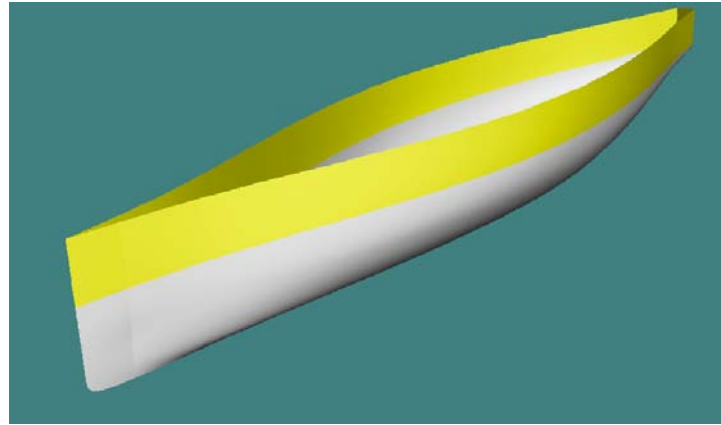


Figura 17: Vista en perspectiva del casco obtenido en la optimización a 8 nudos.

Como es posible apreciar en el bosquejo del plano de líneas (Figura 18) el diseño optimizado para 8 nudos concentra la mayor parte de su volumen en sus secciones medias. El ángulo de ataque de sus líneas de agua es muy pequeño lo que genera una proa muy aguda.

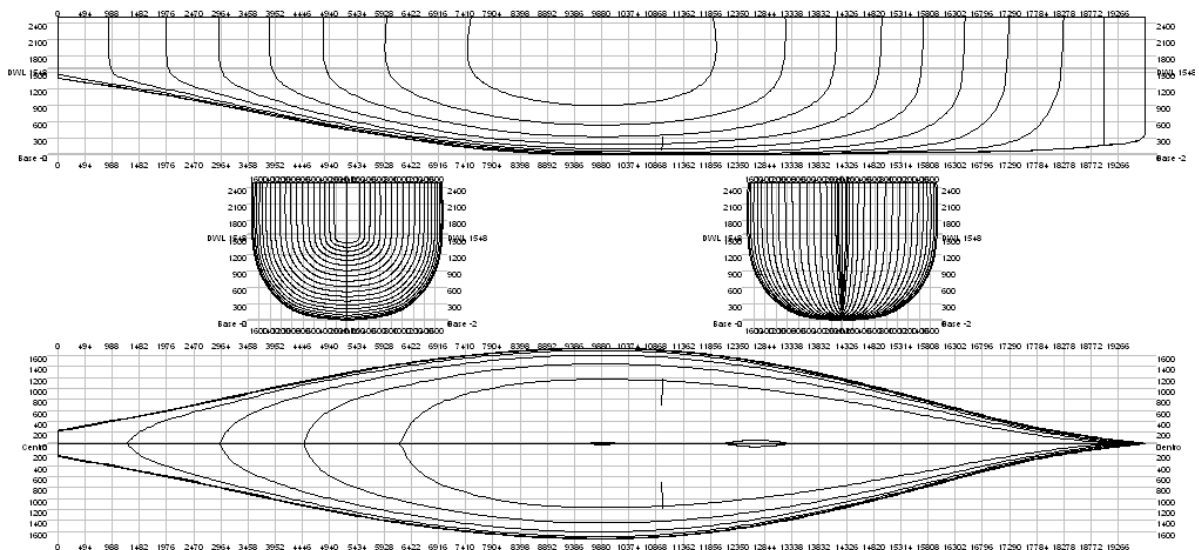


Figura 18: plano de formas del casco obtenido en la optimización a 8 nudos.

Para poder tener una idea comparativa de los rendimientos obtenidos por cada una de las optimizaciones se muestra el gráfico de resistencia al avance de la

embarcación base y de los diseños optimizados. Como es posible apreciar los modelos optimizados muestran curvas que esconden suaves oscilaciones, no así la del diseño base que presenta serias dudas por sus grandes oscilaciones. Esto genera dudas sobre la confiabilidad del programa evaluador Michlet 8.0

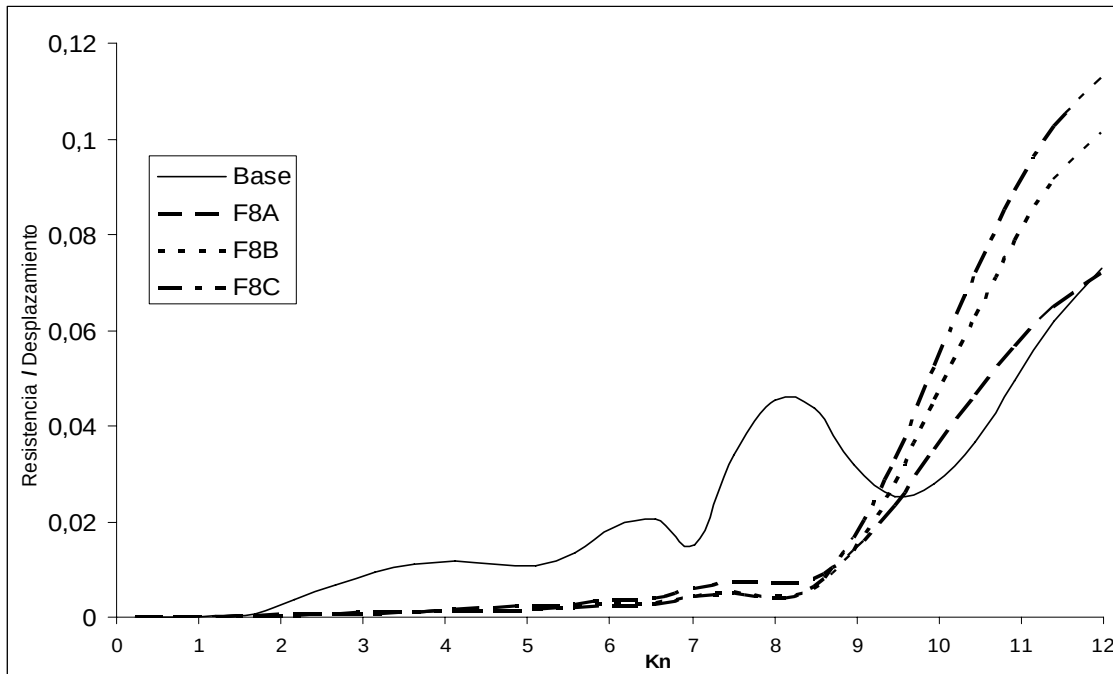


Figura 19: Curvas de resistencia al avance del modelo base y los optimizados a 8 nudos

2.4.3.2 Optimización para una velocidad de 10 nudos

Al igual que en el caso anterior se variaron los rangos de la función 4 del casco matemático. Esta vez los rangos de mangas obtenidas por los diseños optimizados fluctuaron entre 2,13 a 2,57 metros. Una de las tendencias interesantes fue la reducción en el espaciado entre ambos cascos de la embarcación, por lo cual se impuso 7 metros como manga total de la embarcación y se probó posteriormente variarla a 8 pero el rendimiento a 10 nudos empeoraba. La optimización que mostró mejores resultados fue la primera que se realizó y muestra un casco de secciones rectangulares con un leve radio en el pantoque, también el espacio en popa es suficiente para colocar un propulsor convencional.

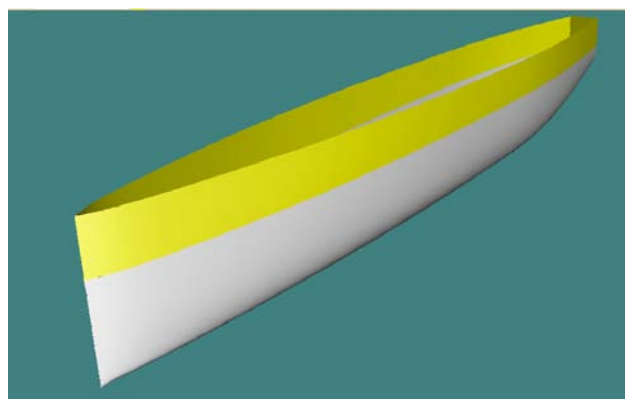


Figura 20: Vista en perspectiva del casco obtenido en la optimización a 10 nudos.

A diferencia de los modelos generados por el optimizador a 8 nudos se nota que la tendencia con respecto a las secciones comienzan a ser más rectangulares, esto se debe a que a estas velocidades parece ser más conveniente cascos más esbeltos, para esto se requiere secciones maestras más llenas que permitan cumplir con el desplazamiento.

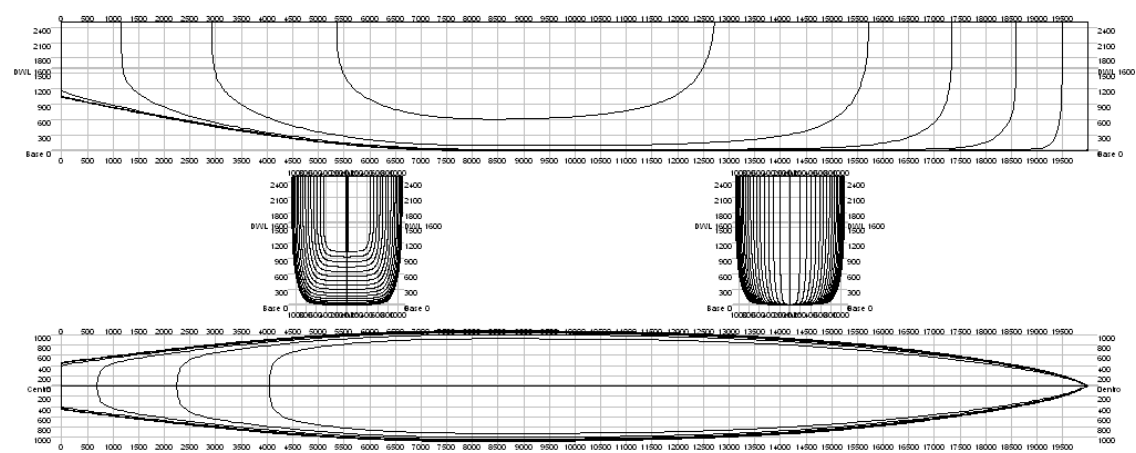


Figura 21: plano de formas del casco obtenido en la optimización a 10 nudos.

Otra ventaja del diseño obtenido en este rango de velocidad es la facilidad que presenta para su construcción en acero, ya que la gran mayoría de las planchas serían planas excepto por las del pantoque que tendrían que ser deformadas pero solo en un sentido, lo que lo hace un proceso económico. Con respecto al rendimiento comparativo de las embarcaciones este se presenta en la figura 22.

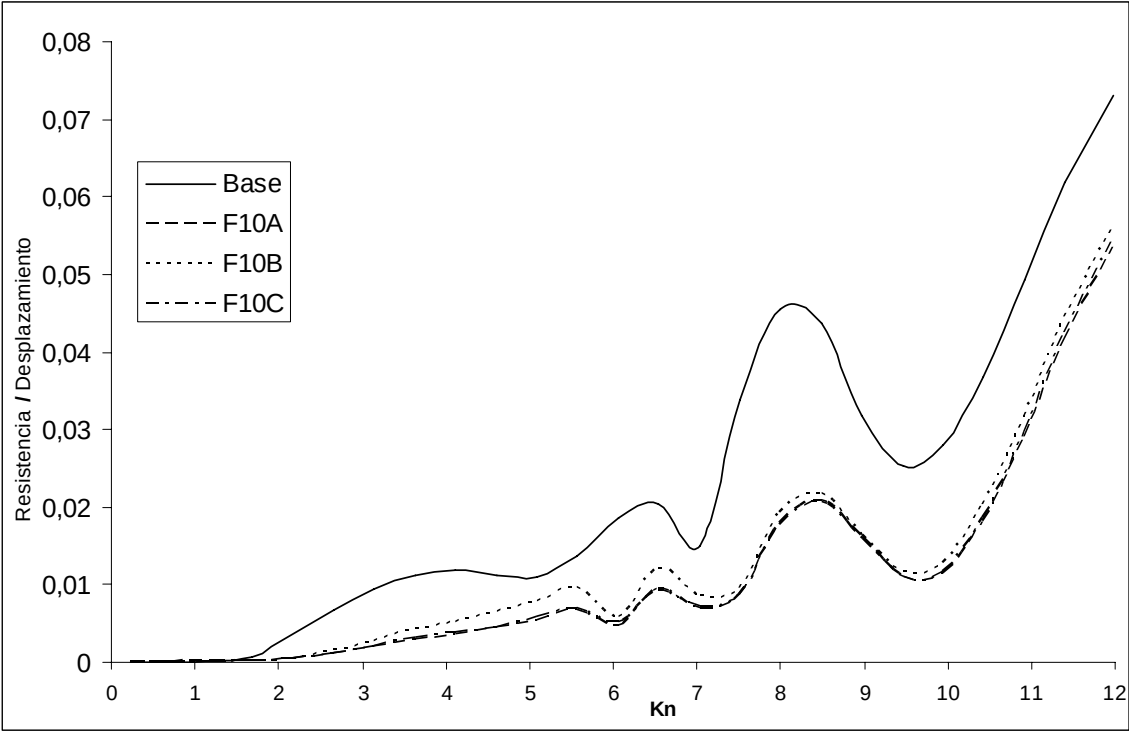


Figura 22: Curvas de resistencia al avance del modelo base y los optimizados a 10 nudos

2.4.3.3 Optimización para una velocidad de 12 nudos

Los diseños que se obtuvieron en esta secuencia de optimización continuaron con la tendencia del caso anterior, es decir, los diseños obtenidos tuvieron una clara tendencia a disminuir la manga de cada casco que compone la embarcación como el espaciamiento entre si, llegando a los valores más bajos de todos los obtenidos con valores de 1,63 metros de manga por casco y una manga máxima de la embarcación de 5,6 metros. Por esto se limitó nuevamente la manga mínima de toda la embarcación en 7 metros y con esto se asegura que se tendrá una cubierta amplia y en consecuencia se aumenta el espaciamiento entre los cascos. Con respecto a las secciones esta se volvieron más rectangulares y la proa y la popa se tornaron en formas muy llenas, esto es un problema en el caso de la popa ya que sería muy complicado colocar un propulsor convencional.

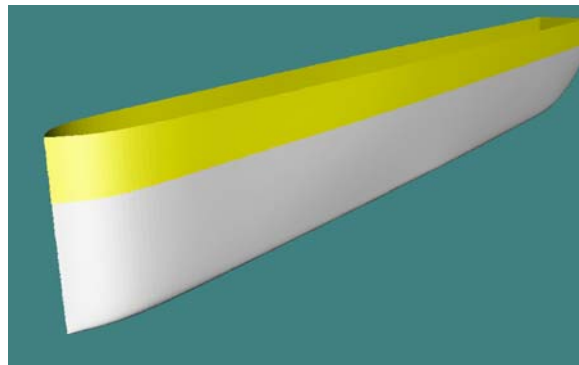


Figura 23: Vista en perspectiva del casco obtenido en la optimización a 12 nudos. A la vez se aumentó el calado a 1,7 metros para lograr el desplazamiento. Esta es una característica poco deseable, ya que comienza a limitar o por lo menos reducir sus capacidades de operación.

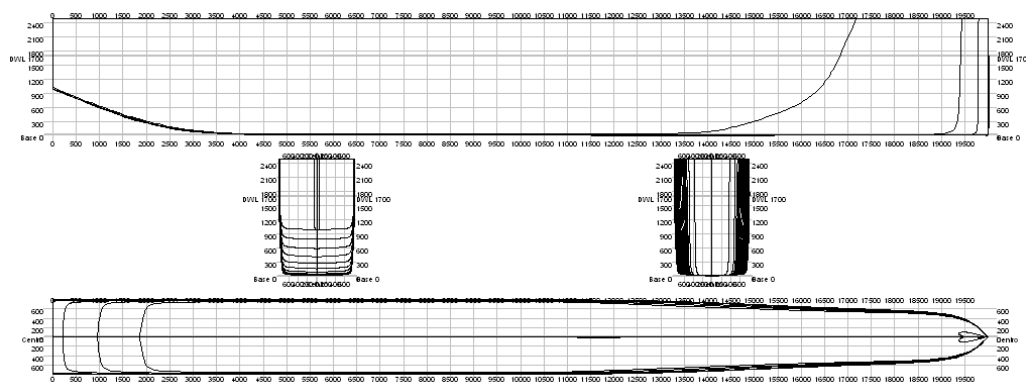


Figura 24: plano de formas del casco obtenido en la optimización a 12 nudos.

Parece claro que al aumentar la velocidad objetivo, los cascos debieran ser más esbeltos, lo que hace pensar que si se tiene como objetivo velocidades más elevadas se debe permitir esloras mayores para poder lograr un buen rendimiento pero para los alcances de este trabajo la tendencia observada es un buen resultado.

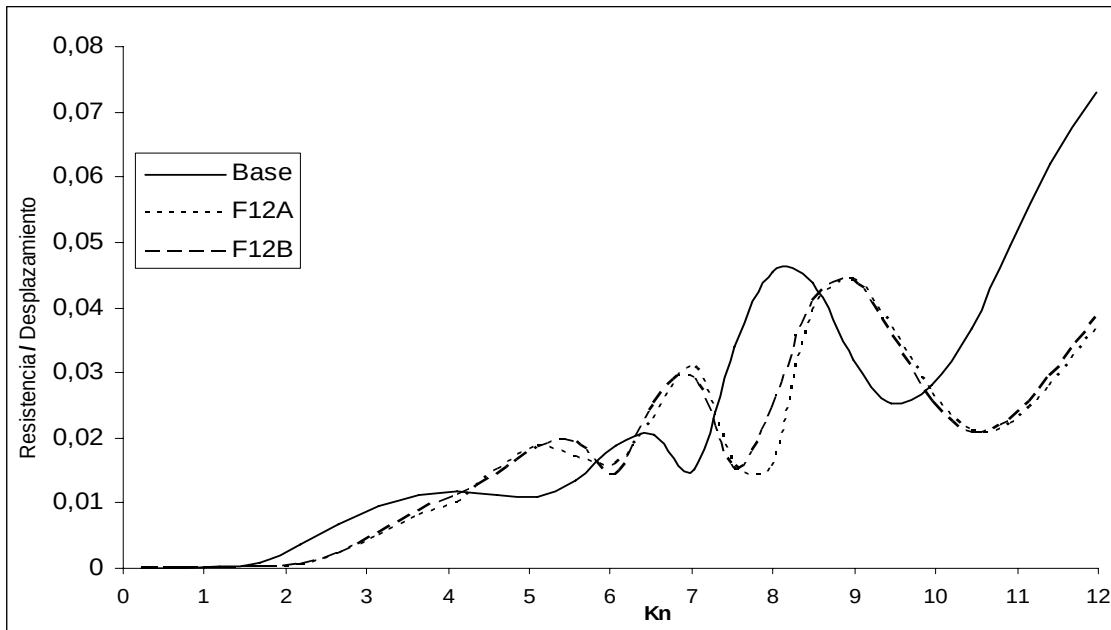


Figura 25: Curvas de resistencia al avance del modelo base y los optimizados a 12 nudos

Con respecto al rendimiento hidrodinámico las curvas de resistencia al avance nos hacen dudar de su exactitud, debido a que no muestran una curva suave si no una que pose varios pick y parece más una onda sinusoidal, características muy poco usuales para las curvas descritas normalmente por otros catamaranes o embarcaciones convencionales. Además las curvas obtenidas muestran un peor rendimiento general en otras velocidades de operación y solo se muestra superior en su velocidad objetivo.

2.4.3.4 Optimización para el rango de velocidad de 8 a 12 nudos

Como último ejercicio de optimización se decidió utilizar la capacidad del programa para combinar velocidades objetivos, lo que lleva mayor tiempo de proceso informático pero si obtienen mejores resultados generales ahorraría un proceso tedioso como el generado en los pasos anteriores de esta estrategia de optimización con algoritmos genéticos.

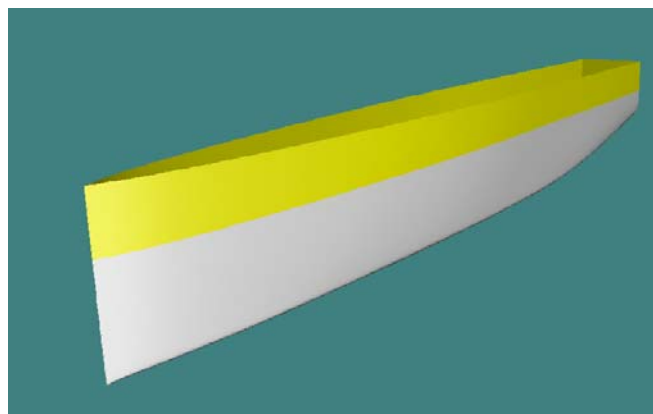


Figura 26: Vista en perspectiva del casco obtenido en la optimización de 8 a 12 nudos.

El modelo que se obtuvo en esta ocasión contenía una gran similitud con la forma obtenidas en la optimización con velocidad objetivo 10 nudos, pero la mayor diferencia fue la manga total de la embarcación que en esta ocasión llego a utilizar el valor de 9,9 metros, siendo este el mayor espaciamiento entre cascos obtenidos. Con respecto a la manga de cada casco que compone la embarcación esta se mantuvo en los 2,06 metros. Otra marcada diferencia es que mantiene sus mangas constantes a partir del primer tercio de la eslora dando la apariencia de una cuña a diferencia de la optimización a 10 nudos que va que tiene su mayor manga en la sección media y posteriormente la va reduciendo a popa. Las secciones son rectangulares y se atribuyen a las mismas razones expuestas en los casos anteriores.

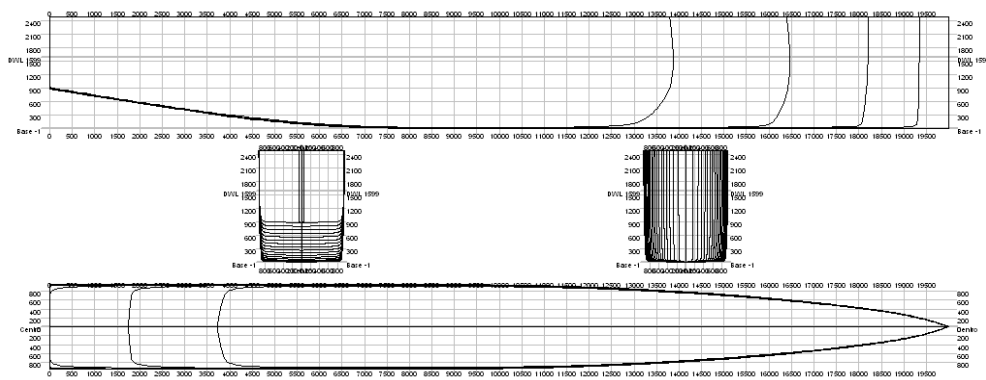


Figura 27: plano de formas del casco obtenido en la optimización de 8 a 12 nudos.

La curva de resistencia al avance mostrada por este diseño no fue tan favorable, pero mostraba un desarrollo sin picks excesivos y se podría decir que es un promedio de los rendimientos anteriores y en general, más parejo.

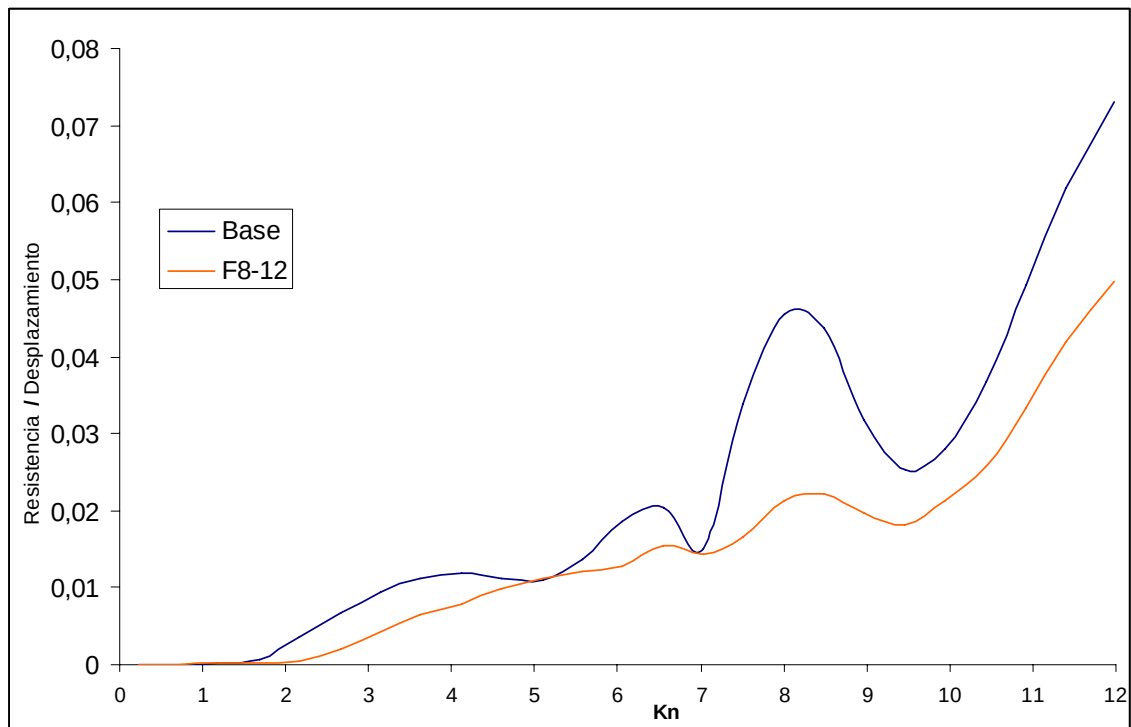


Figura 28: Curvas de resistencia al avance del modelo base y el optimizado de 8 a 12 nudos

2.5 Selección del modelo optimizado final

Después de todos los diseños optimizados obtenidos, donde la mayoría mostraban fortalezas y debilidades se tuvo que decidir con un criterio imparcial cual seria el seleccionado finalmente. Para esto se decidió integrar numéricamente cada una de las curvas de resistencia obtenidas por cada diseño optimizado y se eligió el diseño que tuvo un mejor desempeño general es decir el que tenga menor área bajo la curva, ya que esto representa de cierta manera la forma de menor resistencia en el rango de velocidades elegido. Si bien se había establecido como velocidad operacional los 8 nudos de la embarcación base, hay que realizar una consideración ya que esta embarcación operará en condiciones de corrientes adversas que pueden llegar a los 4 nudos, por lo cual debe tener la capacidad de tener un buen rendimiento a 12 nudos, por esta razón se evalúa toda la curva.

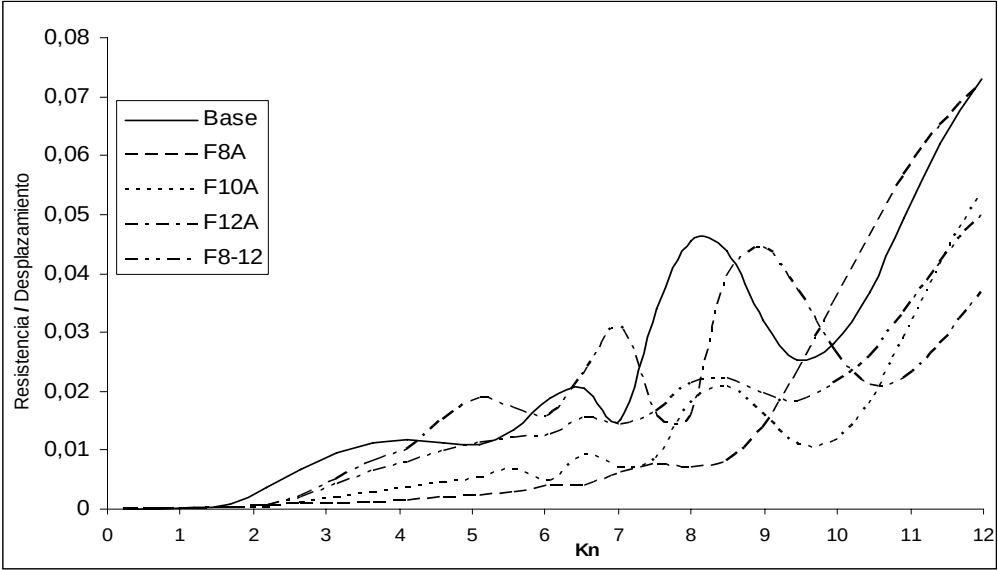


Figura 29: Curvas de resistencia al avance del modelo base y los optimizados

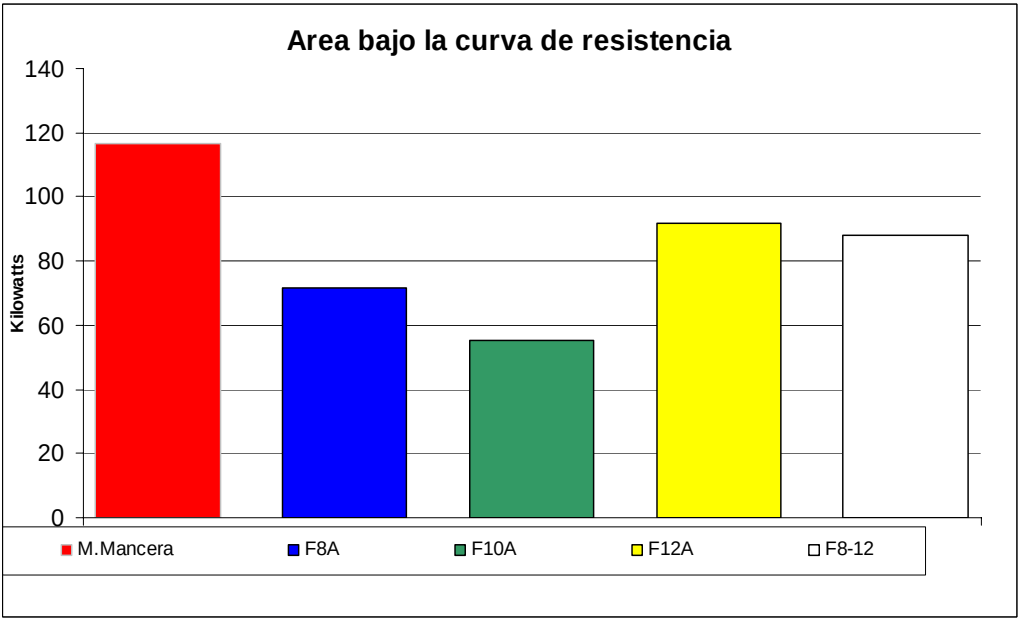


Grafico 30: Área bajo curvas de resistencia al avance del modelo base y los optimizados

Como se aprecia en la figura 30, se puede tener una mejor visión comparativa del rendimiento respecto a la resistencia al avance y como fue descrito anteriormente los rangos que cada modelo obtuvo mejor rendimiento.

Bajo el criterio descrito anteriormente el diseño optimizado que se eligió finalmente el F10A.

Esta selección del diseño F10A como óptimo ha sido hecha solo como un ejercicio académico, ya que el programa Michlet 8.0 demostró posteriormente en validaciones de canal de pruebas (mostrada en figura 32) que produce cálculos de resistencia al avance con grandes errores, tanto en la tendencia de las curvas como en los valores, por lo cual no es confiable la selección de un optimo sin probar en canal de pruebas todos los diseños seleccionados.

2.5.1 Evaluación entre el modelo base y el optimizado

A continuación se presenta un breve resumen de la evaluación numérica realizada con el programa.

Sin duda la primera comparación que se realiza es respecto a las alturas máxima de olas generadas, donde el modelo optimizado se muestra superior en todas las velocidades estudiadas como se presenta en la tabla de resumen

Nudos	M.Mancera	F10A
8	0.998 m	0.460 m
10	0.649 m	0.400 m
12	1.220 m	0.870 m

Tabla 3: Comparación de altura de olas de la estela

Además para lograr tener una mejor visión de las estelas que logro predecir el programa, se realizo un resumen grafico donde se comparan para cada velocidad

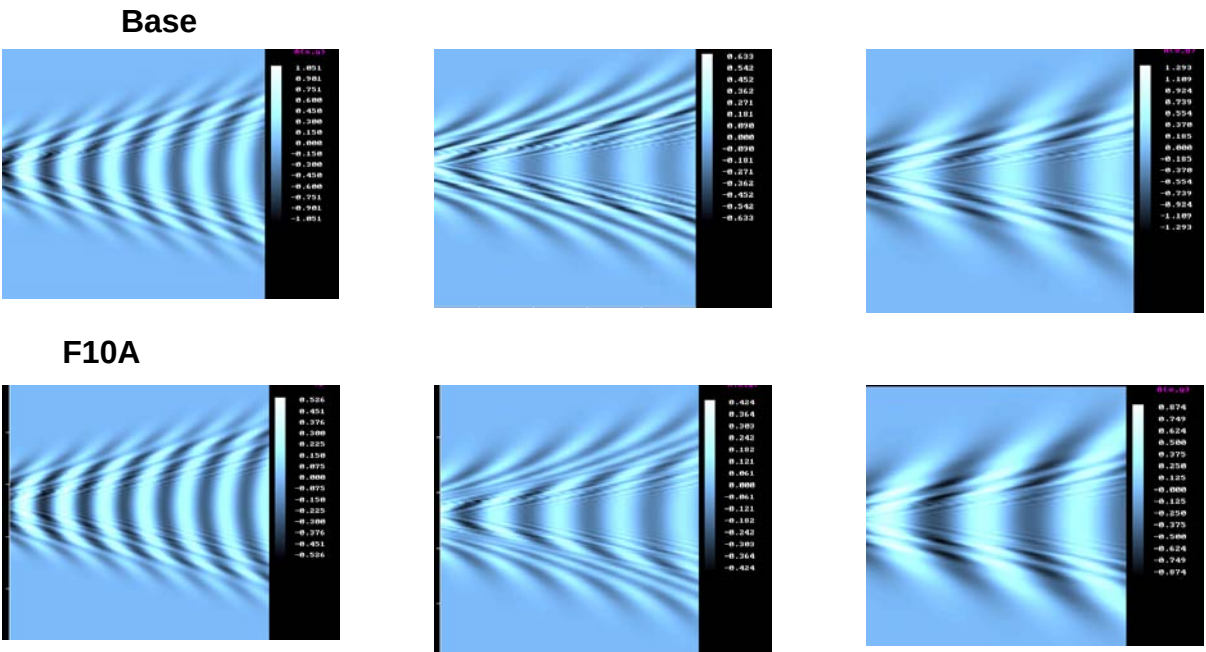


Figura 31: Altura de olas de las estelas del modelo base y el optimizado final

2.6 Validación en el canal de pruebas hidrodinámicas

Para realizar la validación en el canal de pruebas hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile se tuvieron que construir los modelos tanto de la embarcación base como la embarcación optimizada final.

La validación se realizara basada en la ley de similitud de Froude, para esto se escogió una escala de los modelos de 1:20, se considero esta para facilidad de construcción y por que representa un buen tamaño para las características de las instalación donde se realizaran los ensayos.

2.6.1 Características del Canal de pruebas Hidrodinámicas

El canal de pruebas donde se realizaron los ensayos posee un extensión de 45 metros, 2.5 metros de ancho y 2 metros de profundidad. En el es posible realizar ensayos de resistencia al avance, para esto posee instrumental que realiza mediciones de fuerza medida en gramos a una velocidad progresiva o constante medida en metros/segundo. Además es posible realizar ensayos de flujo de corrientes y altura de las olas generadas por los modelos. También es posible realizar ensayos de comportamiento en el mar gracias a su generador de olas.

2.6.2 Método para realizar las mediciones

La principal medición que se realizo fueron los valores de resistencia al avance obtenido por el equipo de medición para realizar una comparación con los obtenidos numéricamente, este resultado es realmente trascendente debido a que nos indica la precisión del programa evaluador, en este caso Michlet.8.0 y las curvas de resistencia al avance del diseño y son fiel reflejo de la resistencia generada por las olas. Además se midió las alturas de olas producidas por los modelos, esta observación se realizo al filmar el paso de las olas por un panel graduado. El panel graduado se dispuso en una ventanilla de observación que tiene el canal a nivel del agua.

2.6.3 Características de los modelos

Como antes se dijo la escala escogida es de 1:20, de acuerdo a esta escala y basado en la ley de similitud de Froude obtenemos las velocidades a las que se ensayaron los modelos y las características dimensionales se resumen en la siguiente tabla:

	M.Mancera	modelo 1	F10a	modelo 2
LOA(m)	20	1	20	1
Lwl(m)	18,7	0,935	19,99	0,995
WOA(m)	8	0,4	7,1	0,355
manga(m)	2,2	0,11	2,14	0,107
Calado(m)	1,53	0,0765	1,6	0,08
Smojada(m^2)	159,34	0,39835	164,4	0,411
Volumen(m^3)	90	0,01125	90	0,01125
Velocidades de ensayo				
Velocidad 1(m/s)	3,086	0,68	3,086	0,68
Velocidad 2(m/s)	4,116	0,92	4,116	0,92
Velocidad 3(m/s)	5,14	1,15	5,14	1,15
Velocidad 4(m/s)	6,16	1,38	6,16	1,37

Tabla 4: Resumen de datos para el ensayo

2.6.4 Recopilación de datos

Los resultados obtenidos en las mediciones de resistencia al avance, donde se obtuvieron 4 puntos de medición se resumen en el grafico y se comparan con los obtenidos numéricamente.

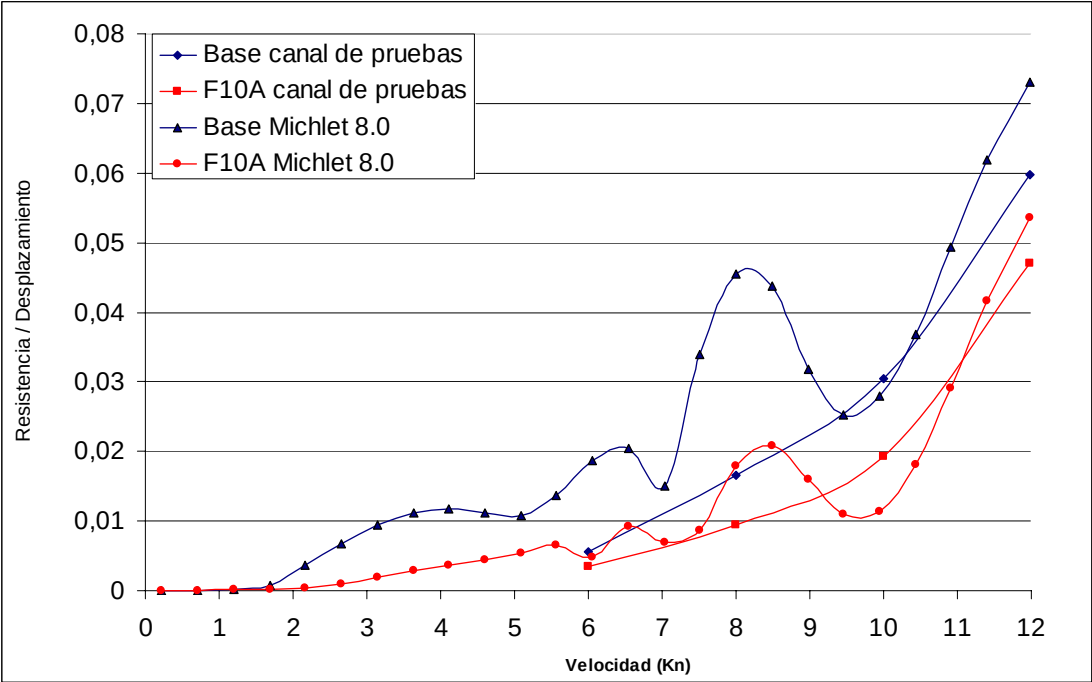


Figura 32: Resistencia total por método numérico y experimental

Como fue comentado anteriormente, las curvas obtenidas con el programa Michlet 8.0 distan mucho de la forma tradicional de una curva de resistencia al avance, lo que se traduce en un amplio margen de error, lo que queda confirmado al ver las curvas obtenidas en los ensayos de canal, A pesar de la gran imprecisión del programa Michlet 8.0 en este caso, se constata, que observando las curvas medidas con los modelos a escala que, el casco seleccionado como optimo efectivamente tiene una notoria disminución en los 4 puntos evaluados como se resume en la tabla 5 con respecto a la reducción porcentual comparado con el diseño base .

Nudos	Base canal (Kilonewtons)	F10A canal (Kilonewtons)	Base Michlet 8.0 (Kilonewtons)	F10A Michlet 8.0 (Kilonewtons)	Reducción canal	Reducción Michlet 8.0
6	4.8	3.1	16.5	4.2	36.0%	74.3%
8	14.6	8.4	40.1	15.8	42.6%	60.5%
10	26.9	16.9	24.7	10.0	37.2%	59.3%
12	52.7	41.6	64.5	47.3	21.1%	26.6%

Tabla 5: Resumen de la optimización en resistencia al avance

En cuanto a la medición de la altura de las olas, ésta se realizo filmando y fotografiando el paso de las olas por un panel graduado, en donde la separación visible era de 5mm que en escala real representan 10cm. Por lo cual los resultados obtenidos con las filmaciones en el canal tienen una precisión de solo 10 cm. Basado en estos resultados se elaboro la tabla 6 que compara a la vez los valores obtenidos con Michlet 8.0

Nudos	Base canal	F10A canal	Base Michlet 8.0	F10A Michlet 8.0	Reducción canal	Reducción Michlet 8.0
8	0.400 m	0.300 m	0.998 m	0.460 m	25%	54%
10	0.600 m	0.500 m	0.649 m	0.400 m	16%	38%
12	0.600 m	0.600 m	1.220 m	0.870 m	0%	28%

Tabla 6: Resumen de alturas de olas obtenidas en canal y en Michlet 8.0

2.7 Conclusiones de la experiencia empírica

Podemos concluir que Michlet 8.0 utilizado como evaluador en la secuencia de optimización fue valido en este caso a pesar de no mostrar una exactitud en sus predicciones, es capaz de evaluar si un diseño tiene mejor rendimiento hidrodinámico con plataformas informáticas económicas y en un reducido tiempo de procesamiento, lo que es esencial para secuencias de optimización basada en algoritmos genéticos en donde se realizan miles de iteraciones para llegar a un resultado optimo. Pero el programa Michlet no es recomendable para una predicción confiable de resistencia al avance para un caso aislado. Eventualmente seria recomendable una vez realizada la optimización reevaluar el diseño obtenido en métodos numéricos mas complejos como los códigos RANSE en conjunto con una validación en canal de pruebas.

En cuanto a la optimización realizada, efectivamente se logro optimizar tanto los aspectos de altura de ola reduciéndola en un 25% respecto de la embarcación original en su velocidad de operación, así como su resistencia al avance, que tuvo una reducción de un 34.2% en promedio respecto a las cuatro velocidades evaluadas.

Capítulo 3: conclusiones generales

3.0 Conclusiones generales

En este trabajo se lograron tres conclusiones generales que vale la pena revisar individualmente, estas fueron.

- 1- Validación de la metodología de optimización
- 2- Aplicabilidad a un caso real
- 3- Conclusiones operacionales entre el diseño base y el optimizado

3.1 Validación de la metodología de optimización

Al igual que se comento en las conclusiones de la experiencia empírica, quedo demostrado que el método del buque esbelto puede ser utilizado como una alternativa económica en secuencias de optimización combinado con algoritmos genéticos para multicascos finos. Ya que en este caso fue capaz de diferenciar que casco es superior a pesar de la baja confiabilidad respecto a la precisión de sus resultados tanto en altura de ola como en resistencia al avance. Por lo cual se recomienda realizar ensayos de canal con modelos de la embarcación base y la ultima seleccionada como optima y verificar si realmente se ha realizado alguna optimización. En otras palabras repetir la metodología de validación realizada en este trabajo.

3.2 Aplicabilidad a un caso real

El trabajo demostró la viabilidad de utilizar comercialmente la plataforma obtenida, ya que esta utilizo exactamente las mismas características de una embarcación que se encuentra actualmente en operación en el perfil de misión y que podría ser construida en el mismo material con un costo de construcción inicial muy similar. Y que es especificada en el anexo 1

3.3 Conclusiones operacionales entre el diseño base y el optimizado

Finalmente podemos concluir que las ventajas operacionales son evidentes. Suponiendo un rendimiento propulsivo de un 50% la embarcación base lograría a su máxima potencia (entregada por 2 motores 140 HP) en condiciones ideales 8.6 nudos, en cambio el modelo optimizado superaría los 10,3 nudos con la misma potencia instalada.

Para el régimen de operación de 8 nudos el diseño base utilizaría cerca de 160HP mientras que el optimizado utilizaría solo 95 HP lo que reduce el costo operacional de la nave inmediatamente en un 42%, además de darle la posibilidad de mantener su velocidad operacional en caso que enfrente corrientes contrarias. De esta manera puede mantener a cabalidad los itinerarios ofrecidos por el armador lo que es esencial para un buen servicio.

Anexo: Anteproyecto virtual

1.1 Consideraciones generales

El concepto de generar un anteproyecto conceptual es darle validez al proceso realizado a través de una aplicación real. Este anteproyecto conceptual se ha basado principalmente en la embarcación base de donde se obtuvieron los requerimientos del armador en cuanto a tamaño de la embarcación y los espacios interiores requeridos. En otras palabras se busca adaptar la plataforma optimizada obtenida en la investigación empírica en el uso que tiene la embarcación base.

Para la generación de este anteproyecto virtual se utilizó una técnica de diseño en un espacio virtual en tres dimensiones, esta técnica dista mucho de la concepción anterior donde se diseñaba en 2 dimensiones donde posteriormente era posible realizar una maqueta a escala del proyecto que fuera más comprensible para las personas que no estaban especializadas en el tema. La posibilidad de poder trabajar en un espacio virtual le brinda gran flexibilidad al diseñador ya que le da la posibilidad de realizar diversas alteraciones en el diseño teniendo la posibilidad de evaluarlas de inmediato en el modelo virtual

1.2 Generación del modelo virtual

Para realizar el modelo virtual se utilizó el programa de modelado en tres dimensiones Rhinoceros 3.0, el cual ofrece una excelente plataforma de trabajo. El primer paso fue lograr la importación de la geometría de los cascos obtenidos en el punto anterior a la nueva plataforma de trabajo.

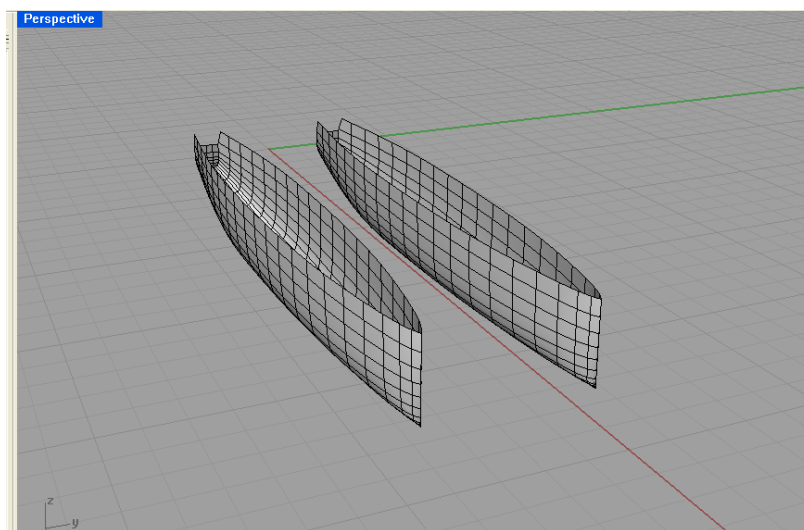


Figura 33: Cascos importados a plataforma de modelación en 3-D

Una vez realizada la importación es posible comenzar la modelación de la superestructura y los espacios interiores.

1.2.1 Requerimientos generales de espacio

Dentro del perfil de operación turístico de esta nave, se encuentra la posibilidad de poder entregar el servicio de restaurante, para esto se han considerado un área de cocina para almacenar los alimentos y dos espacios destinados para comedores, uno en cada cubierta, que a la vez alojan a los pasajeros, además se contemplan las instalaciones sanitarias para hombres y mujeres. Las salas de máquinas están alojadas en cada uno de los cascos de manera independientes. El puente de mando debe estar ubicado en la cubierta superior.

1.2.2 Concepto involucrado en el diseño

El concepto que se busca entregar es una experiencia para el turista, este consiste en aprovechar al máximo el entorno natural en que opera la embarcación. Por esta razón se ha privilegiado el área destinada a pasajeros con una gran visibilidad a través de grandes ventanas y espacios de observación. La utilización de grandes extensiones de vidrio genera la ilusión de estar en una vitrina inversa donde lo que se exhibe es la exuberante vegetación combinada con la navegación fluvial y su fauna. Incluso se ha considerado que el techo de la cubierta superior sea de vidrio.

Siempre basado en el concepto comentado también se tiene en cuenta que el material de construcción es acero, por lo cual las líneas de diseño de la superestructura contemplan curvaturas en un solo sentido para una mayor facilidad constructiva, si descuidar la estética, que en este tipo de embarcaciones es un factor preponderante en la elección del potencial pasajero.

1.2.3 Verificación ergonómica de los espacios

Una de las principales potencialidades de trabajar en un ambiente virtual en tres dimensiones es la posibilidad de generar evaluaciones de la ergonomía de los espacios que se están diseñando para ser utilizados por los pasajeros.

Para esto se modeló un dummy o muñeco virtual con las dimensiones y radios de movilidad de una persona real. Este muñeco puede ser dispuesto de varias formas para evaluar distintos casos posibles que se den dentro de los espacios a evaluar.

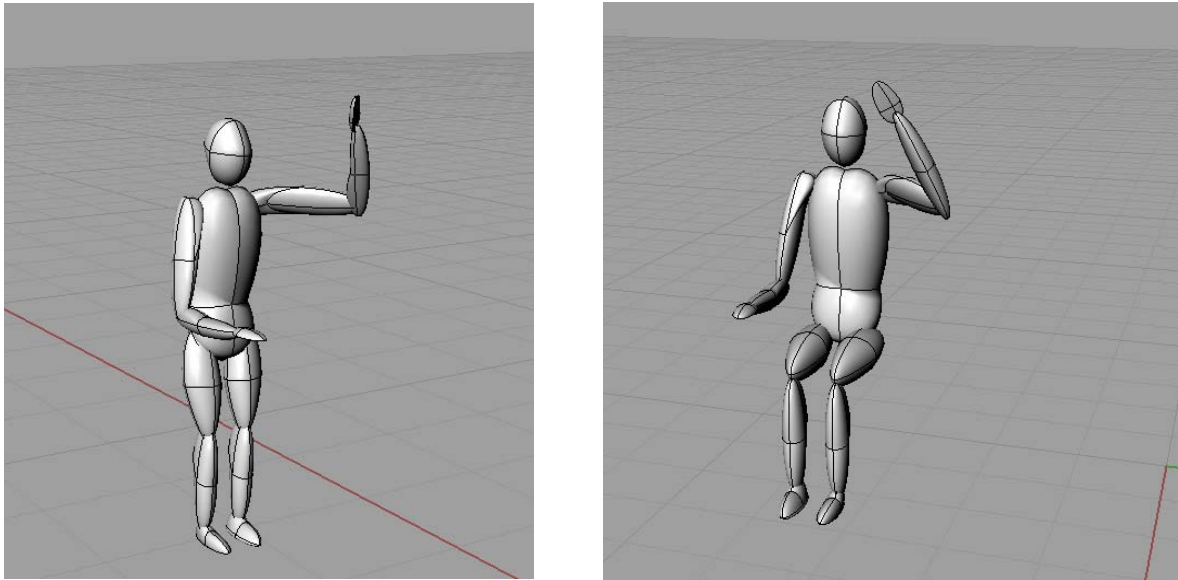


Figura 34: Muñeco virtual para evaluación de espacios

A modo de ejemplo se muestra el caso de evaluación del posicionamiento de la escala que lleva al segundo piso y que interfería con el pasillo que comunicaba

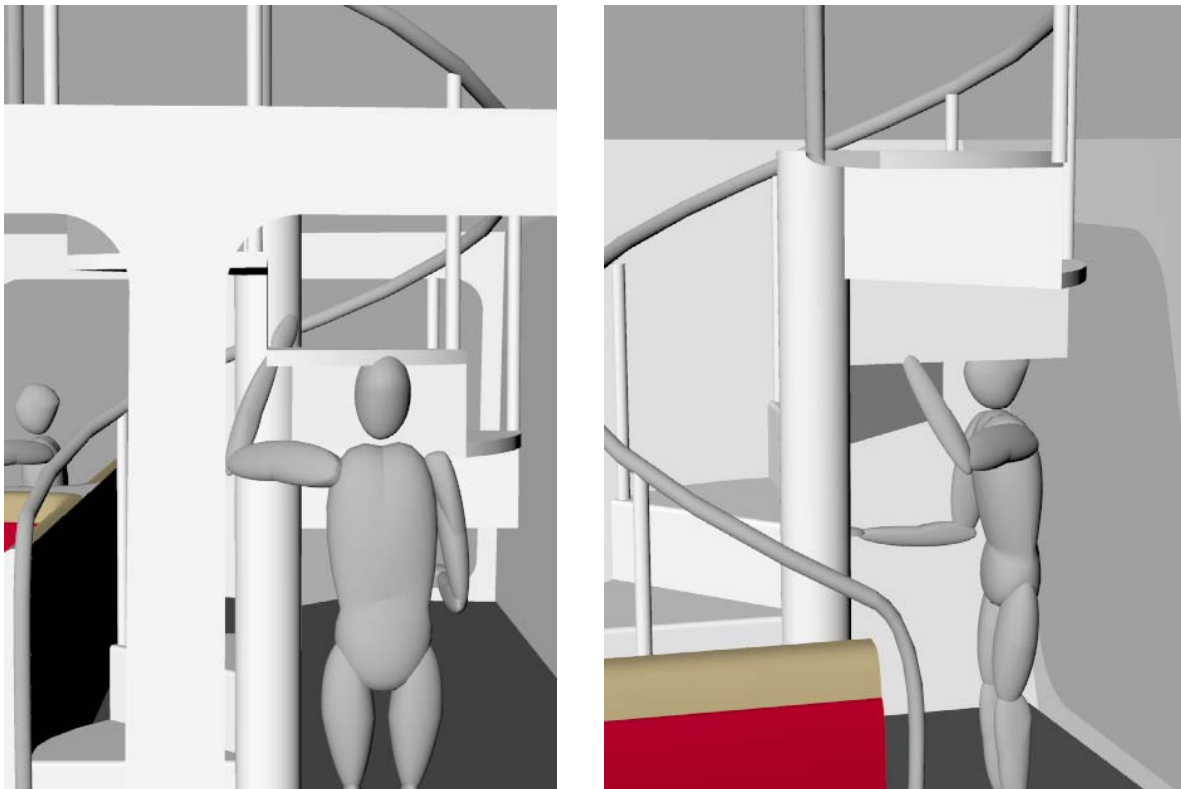


Figura 35: Evaluación ergonómica por la interferencia de la escala

a los servicios sanitarios, si bien era posible mover la escala hacia el centro de la embarcación se le quitaba progresivamente espacio a la cocina, lo que a la vez reducía la comodidad de la misma por lo que se hizo necesario la evaluación con el muñeco para poder optimizar el espacio hasta que ya no existiera interferencia con el pasillo quitándole el mínimo espacio destinado a el área de cocina.



Figura 36: Verificación ergonómica de espacios

3.2.4 Arreglo general desarrollado

En la definición de espacios se utilizó el modelo base, el que incluye 2 cubiertas. En la primera cubierta se alojaron las instalaciones sanitarias, la cocina y un gran salón comedor que alojaría a la mayoría de los pasajeros durante el viaje a la vez de dar un servicio de restaurante.



Figura 37: Disposición de la cubierta inferior

En el segunda cubierta se aloja el puente de mando y otra zona para pasajeros con un snack bar, además se ha dispuesto una terraza de observación al aire libre pero cubierta con techo de vidrio. Ambas cubiertas están conectadas por una escala de caracol que a la vez sirve para separar los espacios en ambas cubiertas.

En la primera cubierta separa el área de restaurante de la cocina y el acceso a los baños, en cambio en la segunda genera un espacio ideal para el snack bar.



Figura 38: Disposición de la cubierta superior

Como antes se mencionó los motores, tanques y bombas, como suele ser usual en los catamaranes, se alojarían en salas de máquinas independientes en cada casco. Esta característica es ideal para un buque de pasaje ya que es más fácil generar un buen aislamiento de la sala de maquinas en cuanto al la generación de ruidos por los motores tanto al medio ambiente como al interior del buque.

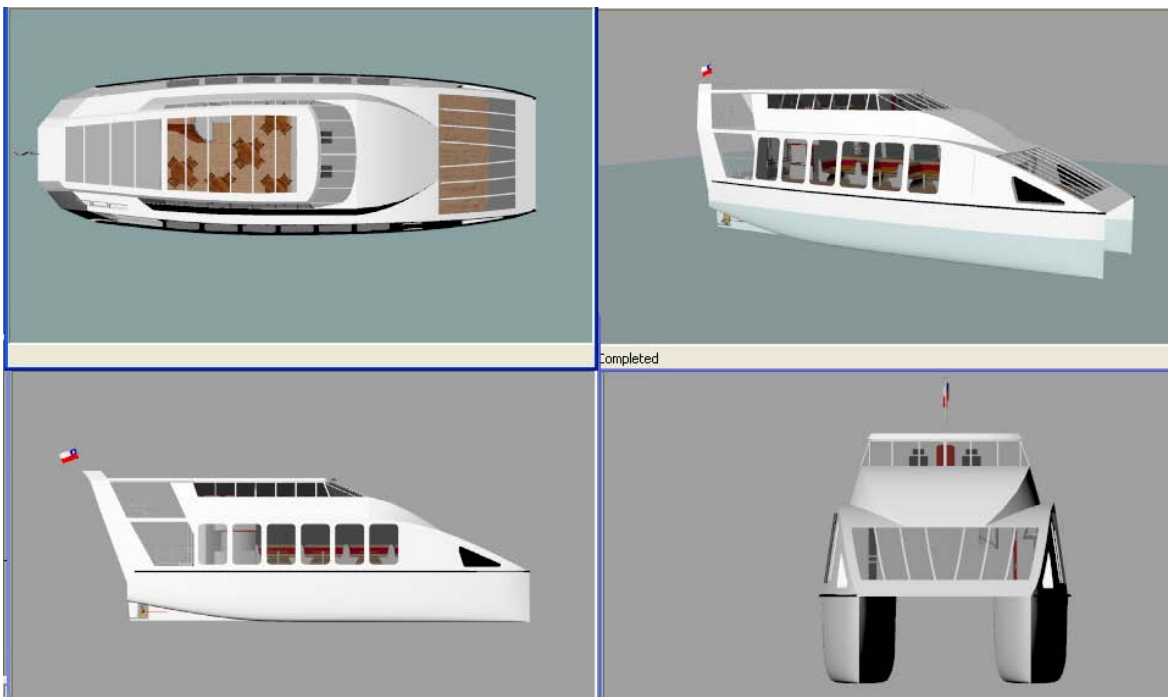


Figura 39: 4 vistas del anteproyecto conceptual propuesto

Referencias

Michell, J.H. (1898) The wave resistance of a ship

Herreros y Souto, (2001) La influencia de los fenómenos “wake-wash” y “squat” en el diseño de buque.”

Marine Accident Investigation Branch: 'Report on the investigation of the man overboard fatality from the angling boat Purdy at Shipwash Bank, off Harwich on 17 July 1999'. Report MAIB 1/10/99, 23pp.

Kofoed-Hansen, H., Kirkegaard, J., Technical Investigation of Wake Wash from Fast Ferries. Danish Hydraulic Institute, Report No. 5012, 1996.

Agreement FTA-WA-26-7007-005 Wave Energy Evaluation of Passenger Only Ferries in Rich Passage – April 2005

Bishop,M.J(2003) The effects of boat-wash on macrobenthic assemblages of estuaries

Thomson, W. (Lord Kelvin), (1887) On Ship Waves

Stumbo, Fox y Elliott(2002)Hull Form Considerations in the Design of Low Wake Wash Catamarans

The Naval Architect july/august 2006 CAD/CAM update pag. 69

E.O. Tuck, D.C. Scullen and L. Lazauskas(1998) Ship-wave patterns in the spirit of Michell

E.O. Tuck, D.C. Scullen and L. Lazauskas, report 1 (1999) report 2(2000) Wave patterns evaluation

E.O. Tuck, D.C. Scullen and L. Lazauskas(2002) Wave Patterns and Minimum Wave Resistance for High-Speed Vessels

Lazauskas, L,GODZILLA manual (2000)

Lowe,T, (2004)The Design of PDE Hull Surfaces Using Genetic Algorithms

DOCTORS, L.J.; DAY, A.H. (2000), The Survival of the Fittest – Evolutionary Tools for Hydrodynamic Design of Ship Hull Form, Royal Inst. Naval Arch.