Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Centro Atómico Bariloche
Comisión Nacional de Energía Atómica

Sobre veleros y escalas de abordaje

Ernesto N. Martínez

Bariloche
1993

Sobre veleros y escalas de abordaje

Ernesto N. Martínez

1 Introducción

El barco a vela es uno de los más hermosos artefactos que haya creado el hombre. Aún el más humilde velero tiene para su tripulación, y seguramente para el arquitecto que lo ha diseñado, una personalidad tan marcada como la de un ser humano.[1]

Sin embargo, en este trabajo trataré de explicar que hay similitudes entre ellos, tendencias generales, que son más profundas que las simples semejanzas geométricas, y tal vez aún que las que ven sus constructores. Para ello usaré datos publicados que están al alcance de todos, y matemáticas que solamente requieren saber qué es un logaritmo. Estudiaré las relaciones entre diferentes medidas de veleros monocascos y pondré de relieve la dimensionalidad de cada una de ellas, a través de exponentes que caracterizan cómo *escalea* una con otra, para usar la expresión corriente en la Física actual. La palabra *escala* tiene numerosos significados; aquí la uso en el sentido de los mapas. Los territorios pintados en un mapa de una zona pequeña de la Tierra son similares a sus modelos reales, pero si se usa la proyección Mercator para un mapamundi se pierde esta semejanza. Las escalas en el sentido este-oeste dependen ahora de la latitud: un mapa plano de una Tierra esférica no reproduce fielmente la forma de los países. A pesar de éso, es un buen mapa, si conocemos las escalas, que nos dicen cuánto es una dada longitud sobre la Tierra, conociendo la del mapa.

En los últimos veinte años se han desarrollado en la Física métodos teóricos que estudian las posibles similitudes de un sistema con sus partes, usando precisamente estas transformaciones de escala. Cuando estas similitudes existen, como en el caso de los fenómenos críticos o la percolación, son los llamados "exponentes críticos" los que describen la física a un nivel más profundo que el detalle del sistema especial que se trate. Las leyes de escala

[1] Los ingleses, nación navegante por excelencia, que usan el pronombre neutro cuando hablan de sus niños, llaman *she* a sus barcos.

permiten comprender relaciones en sistemas muy diversos sin entrar en el detalle de los mismos. Esta generalidad les da un enorme valor formativo.

Este artículo es una introducción simple a estos conceptos, usando material experimental al alcance de todos.

2 Formas y relaciones

La materia prima para este artículo la he encontrado en una pila de revistas de navegación. La mayoría de ellas son viejas, y los apasionantes artículos que ofrecen en sus tapas constituyen la menor parte de su contenido. La verdad es que estas revistas son puramente comerciales, y su contenido real son avisos de propaganda. Los datos sobre veleros actuales que he usado en este trabajo provienen exclusivamente de tales avisos.[2]

Todos los anuncios de veleros monocascos (excluyo los catamaranes y trimaranes) que traen las revistas del tema muestran barcos muy parecidos: cualquiera que sea su ancho máximo (*manga*), tienen un largo (*eslora*) unas tres veces mayor[1, 2].

Los marineros tienen una jerga propia, que en parte es de origen técnico[1, 3], y en parte proviene del deseo de aparentar profundidad a través de la oscuridad. Lo mismo que hacemos los físicos.

2.1 Eslora y manga

Indudablemente, barcos más largos son más anchos. En la figura 1 he graficado la manga en función de la eslora (ambas en pies) para medio centenar de barcos modernos diferentes, y he trazado la recta que mejor se adapta a los puntos. Esta recta, de la forma

$$\text{manga} = a \times \text{eslora} + b, \tag{1}$$

predice para cada eslora una manga que en general muestra una diferencia con las "experimentales." La mejor recta es la que minimiza la suma de los cuadrados de estas diferencias, y por ello el método que nos permite calcular las constantes a y b se llama de "cuadrados mínimos." Para la figura 1 resultan a=0,1897 y b=4,3854 pies, lo cual me dice que para una eslora de unos 30 pies la manga es efectivamente 10 pies, o sea un tercio de la eslora.

[2]Sacados de las revistas *Barcos*, de la Argentina; *Cruising World* y *Yachting*, de EEUU; *Die Yacht*, de Alemania; *Yachting World*, del Reino Unido y suplemento *Skep Ohoy* del diario *Svenska Dagbladet*, de Suecia.

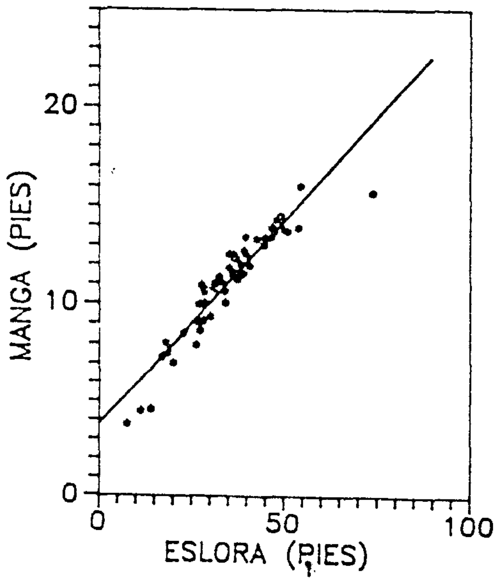


Figura 1: Manga en función de la eslora para veleros modernos. Ambas están dadas en pies.

2.1.1 Relaciones de escala

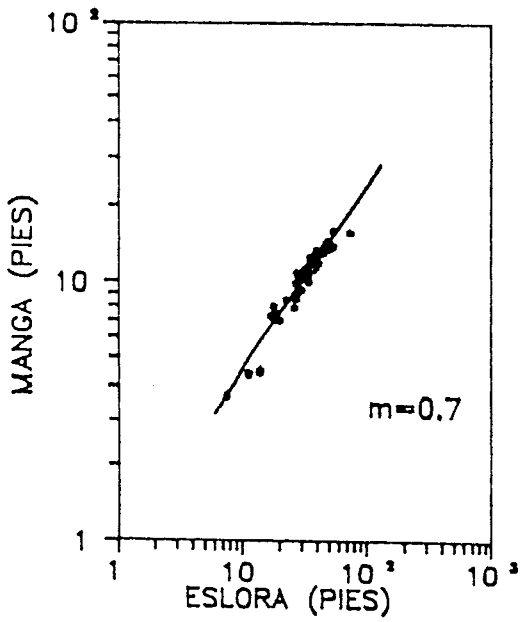
Aunque esta aproximación lineal parezca satisfactoria, no la voy a creer, por motivos puramente ideológicos. Me rehuso a creer que por cada metro que el arquitecto naval agrega a la eslora también añade 19 centímetros a la manga, o que un barco de longitud nula tenga uno treinta de ancho. Lo que sí creo es que la manga debe estar a escala con la eslora. Esto no significa que deba ser una fracción fija de ella, sino que, de manera más general, debería ser una función homogénea de la eslora, y que su grado de homogeneidad debe ser positivo, para que ambas tiendan a cero simultáneamente. Puede parecer que mi actitud es prejuiciosa, porque al fin y al cabo el tratamiento matemático de la figura 1 es totalmente correcto. Pero la ciencia exige criterio además de matemáticas, y es precisamente en este punto donde fallan muchos análisis estadísticos. Las hipótesis de escaleo que se usan en Física actualmente son *suposiciones* sobre cómo sería razonable que variara una magnitud en función de otra. Suposiciones sin prueba. Es debido a que esas suposiciones han sido hechas por científicos criteriosos, con mucha intuición física, que están dando tantos frutos.

En nuestro caso, esta creencia quiere decir que espero que se cumpla que

$$\text{manga} = C \times \text{eslora}^m, \tag{2}$$

con $m > 0$. Esta expresión no tiene la forma lineal de la forma 1, así que

Figura 2: Manga en función de la eslora, ambas en pies. Escalas logarítmicas en ambos ejes.



no podemos usar el método de los cuadrados mínimos, pero si tomamos logaritmos de ambos miembros de la expresión 2 obtenemos

$$\log \text{manga} = m \log \text{eslora} + \log C \tag{3}$$

que sí es lineal. Basta entonces con representar la manga y la eslora en papel log–log, que es lo que haré en lo que sigue. La figura 2 muestra, pues, los mismos datos de la 1, pero en escala logarítmica. La representación doble logarítmica hace que los puntos se distribuyan en una banda de ancho constante, en vez de en un triángulo que se abre hacia la derecha, como en la figura 1.

Esta banda es recta. Su pendiente, dada por el exponente m, describe una tendencia general; las fluctuaciones de los puntos alrededor de esa tendencia representan la libertad, la creatividad o el capricho de cada artesano individual. El exponente es $m = 0,70 \pm 0,05$. El error del exponente lo he estimado. Hay dos cosas que se pueden decir sobre este exponente m:

1. la primera es que $m = 1$ significaría que manga y eslora son proporcionales, y que todos los veleros son semejantes, en el sentido usado con los triángulos de Tales. El valor obtenido, 0,7, es suficientemente cercano a 1, por lo cual percibimos una semejanza aproximada;

2. la segunda es que m es claramente *menor que uno*.

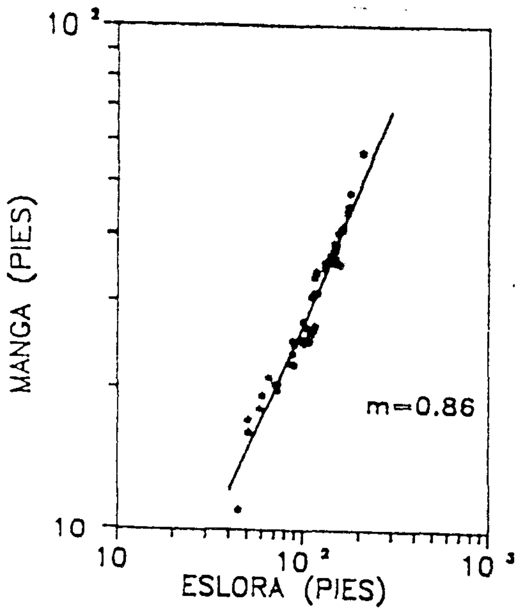


Figura 3: Manga en función de la eslora para 48 navíos históricos.

Un exponente positivo diferente de 1 significa que al cambiar de tamaño las escalas vertical y horizontal en un plano se expanden o contraen a un ritmo diferente. Y un exponente negativo quiere decir que cuando una escala se expande, la otra se contrae. En nuestro caso, el $m = 0,7$ implica que los barcos **no son semejantes**, que al aumentar de tamaño los cascos se hacen más esbeltos, pues

$$\begin{aligned}\frac{\text{manga}}{\text{eslora}} &\propto \text{eslora}^{m-1} \\ &\propto \text{eslora}^{-0.3},\end{aligned}$$

una función suavemente decreciente de la eslora.

2.1.2 Los de Brown

Sabemos, por estudios históricos y por los ejemplares que sobreviven, que los veleros antiguos eran más largos y esbeltos que los actuales. En la figura 3 he graficado, siempre en escala doble logarítmica, las esloras y mangas de 48 veleros que navegaron entre 1750 y 1830[4]. Varios de ellos tuvieron un papel destacado actuando como corsarios con bandera argentina. Obtengo 0,86 para su exponente, con un error que estimo similar al anterior. La relación manga/eslora típica es de alrededor de 1/4: claramente los constructores

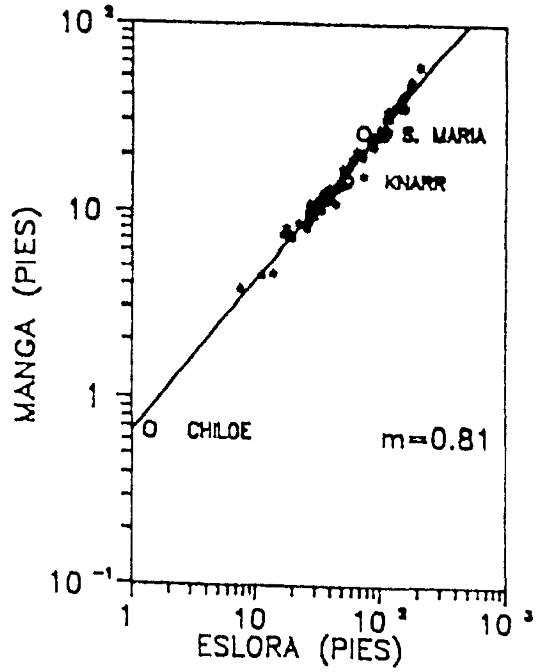


Figura 4: Manga en función de la eslora, para veleros antiguos y modernos.

de hace dos siglos tenían otros criterios, que hemos superado con nuestros diseños auxiliados por computadoras. ¿O tal vez no?

2.1.3 All together now

En la figura 4 he representado nuevamente esloras y mangas para ambos grupos, nuevos y antiguos, *juntos*, y se ve que ambos grupos son indistinguibles. Es notable que un sólo exponente, $m = 0{,}81$, alcance para describirlos a todos: el hecho de que los constructores modernos diseñen barcos *mangudos* y que los antiguos los hiciesen esbeltos parece deberse, más que a criterios diferentes de diseño, a que ambos grupos han trabajado en diferentes rangos de tamaños.

Estos diferentes rangos se deben a claros motivos económicos. Los veleros actuales son casi exclusivamente artefactos deportivos de propiedad individual, lujos prescindibles que se usan cuando el dueño quiere, y se los hace cada vez menores a medida que el deporte náutico se democratiza. Los veleros antiguos, en cambio, representaban una parte importante del comercio (y de hecho la vida misma de las colonias americanas que construyeron los que he graficado) y se construían para afrontar el océano en toda clase de tiempo. Eran, en suma, barcos en serio y no juguetes.

2.1.4 Una sola ley

Sin embargo, una misma ley, expresada por el exponente m, parece haber gobernado a los constructores en su trabajo, independientemente de las diferencias de tamaño, la separación de dos siglos y la diversidad de materiales y conocimientos técnicos accesibles a los dos grupos.

Por curiosidad, he superpuesto en la figura 4 tres barcos que no he usado para calcular el exponente m. El mayor de los tres es la Santa María o Marigalante[3], la nave capitana de Colón, que queda claramente por arriba de la recta de ajuste. Las carabelas del siglo XV se construian según la vieja regla de "as, dos, tres" para las longitudes de manga, quilla y eslora, lo cual las hacía muy mangudas para los criterios de la época, y más parecidas a naves actuales. El punto siguiente representa a un "knarr" nórdico del siglo X hallado en Roskilde, Dinamarca, y vemos que se ajusta exactamente a la ley general.[4] El último punto extra, marcado "Chiloé", es un juguete, una copia de 43 cm de eslora de los veleros chilotes del sur de Chile. Lo he incluído porque me consta que los artesanos que los tallan no los hacen a escala. Sospecho que las mismas reglas estéticas inconscientes que determinan el resto de la curva actuaron en este caso.

2.2 Viento en popa, a toda vela...

Otro parámetro que dan los avisos de veleros suele ser la *superficie vélica*: la superficie total de paño que puede desplegar el barco, excluyendo velas especiales como el llamado spinnaker. La figura 5 muestra la superficie vélica en función de la eslora para 52 yates modernos. Es de esperar que se cumpla aquí una relación del tipo

$$\text{superficie} \propto \text{eslora}^s, \tag{4}$$

con un exponente s del orden de 2, pues las velas son objetos bidimensionales y su área debería ser proporcional al cuadrado de las dimensiones lineales. Para el caso de la figura 5 se obtiene $s=$ 1,84. Hay una buena razón para que

[3] Según una reconstrucción medía 22,5 metros por 8 metros. Nadie sabe a ciencia cierta cuánto medían los barcos del Primer Viaje.Los buques españoles de la época tenían dos nombres, uno oficial y otro familiar que usaban los marineros. Los sobrenombres de las naves de Colón muestran que sus tripulantes estaban interesados en lo mismo que todos los marineros de todos los tiempos.

[4] El knarr era el barco de comercio de los vikingos, y no hay que confundirlo con los drakkar, las naves de rapiña que se ven en las historietas de Asterix.

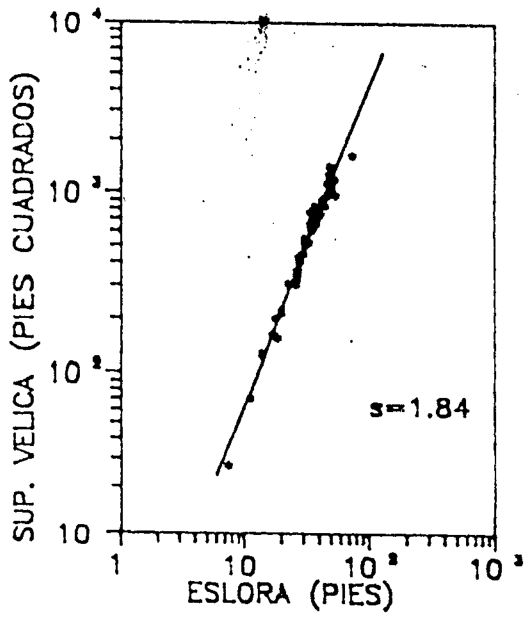


Figura 5: Superficie vélica, en pies cuadrados, en función de la eslora, en pies, para veleros modernos.

el exponente sea menor que 2: los barcos pequeños se usan para navegaciones cortas durante las cuales reciben la atención constante de su tripulación, y se los suele "sobrevelar." Los barcos grandes son más conservadores. Esto hace que $s < 2$.

2.3 Todo cuerpo sumergido desplaza...

El cuarto número que dan los avisos es el *desplazamiento*, que es, más simplemente, el peso del barco, si recordamos el principio de Arquímedes. Es razonable suponer una relación del tipo

$$\text{desplazamiento} \propto \text{eslora}^d, \tag{5}$$

con un exponente d del orden de 3: el peso de un objeto es proporcional a su volumen, suponiendo que las densidades de los componentes de los barcos sean independientes de sus tamaños. La figura 6 muestra la relación desplazamiento–eslora para los 52 barcos modernos que estamos considerando. El exponente resulta ser $d = 3.4$, algo mayor que el tres que podríamos esperar por argumentos dimensionales (en realidad, podríamos esperar $d \simeq 1 + m + c$, donde c sería el exponente que relaciona el *calado* con la eslora. Si $c \simeq m$, entonces $d \simeq 1 + 2m = 2.6$). Esta diferencia podría deberse a que los barcos se hacen proporcionalmente más pesados al aumentar su tamaño, o a que, al revés, los barcos más pequeños son más livianos de lo que deberían

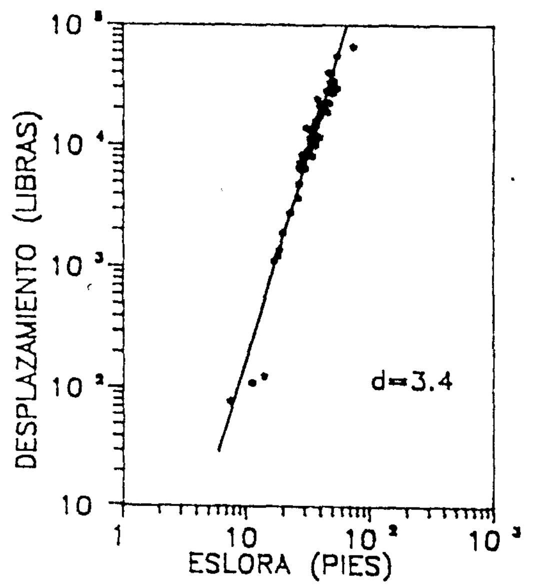


Figura 6: Desplazamiento (peso) en libras en función de la eslora en pies, para veleros modernos.

ser. Creo que la razón es la segunda (las dos causas no son equivalentes) por motivos que explicaré más adelante, cuando trate de la física de estos exponentes.

3 Forma versus sustancia

El yachting tiene la fama de ser un deporte de ricos, y no es accidental que este trabajo haya surgido del estudio de revistas viejas de navegación y no de veleros reales. Pero raramente se dice cuánto cuesta un velero. Su precio debe seguramente aumentar con su eslora, pero ¿cómo? No siempre las motivaciones de la investigación científica son absolutamente puras. Debo confesar que este estudio lo comencé por esta relación precio–eslora, tratando de ver cuál era el mayor barco que podía llegar a comprar con mis ahorros.[5] La suposición obvia a esta altura es

$$\text{precio} \propto \text{eslora}^p. \tag{6}$$

Por desgracia, los argumentos dimensionales que nos sirvieron de guía arriba se mezclan y nos sirven de poco en este caso para predecir el valor de p. En efecto, hay en un velero elementos unidimensionales, como las

[5] Revistas.

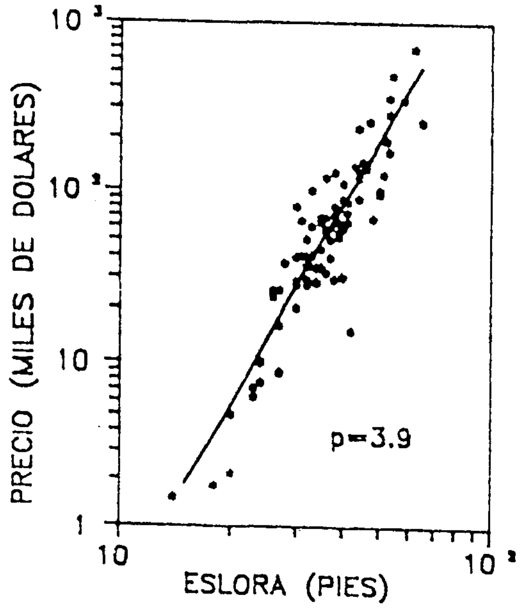


Figura 7: Precio, en miles de dólares, en función de la eslora en pies, para 167 veleros modernos.

cuerdas y cables[6], que deberían contribuir al precio como la eslora, otros, como las velas, pinturas y diversos recubrimientos, que son netamente bidimensionales, y aportarían una eslora al cuadrado, y por último otros que son seguramente tridimensionales, por ejemplo el lastre, una fracción más o menos fija del desplazamiento. De cualquier manera que combinemos estas componentes, debería ser $p \leq 3$. La figura 7 muestra precios del mercado norteamericano y sueco, en miles de dólares, en función de la eslora para 167 yates modernos. Este gráfico incluye precios de barcos de todas las edades que estaban a la venta en el mes de mayo de 1988.[7] Debo aclarar que el precio de venta de un barco usado no sufre el decrecimiento exponencial con el tiempo que experimentan, por ejemplo, los autos. Un velero usado puede mantener y aún aumentar su valor de nuevo, dependiendo del cuidado que le brinde su tripulación, de los extras que se le adicionen, de las regatas que gane. También hay que decir que un accidente, como una muerte a bordo,

[6]No son necesariamente más gruesos en barcos mayores. En general, el requerimiento de que las cuerdas sean cómodas para la mano del tripulante lleva a sobredimensionarlas en barcos chicos.

[7]Los precios deben ser tomados todos al mismo momento para evitar errores inflacionarios. Los precios norteamericanos provienen de los avisos aparecidos en el *Cruising World* de mayo de 1988. Dado que en ese país casi no hay oferta de barcos chicos, agregué 29 barcos suecos de pequeña eslora, cuyos precios, de junio de 1983, traduje de coronas a dólares y corregí por inflación.

puede hacer invendible al mejor de los veleros.[8] Esta variación determina la gran dispersión en este gráfico. El exponente que encuentro, p, es 3,9, **mucho mayor** de lo que esperaba.

Es extraño encontrar una magnitud con un comportamiento tetradimensional en este problema. Esta cuarta dimensión puede deberse a tecnología más sofisticada en los barcos mayores, a tiradas menores, o a codicia pura y simple de los astilleros, lo que uno podría llamar un "efecto Robin Hood incompleto." El caso es que el precio por kilo de un velero es proporcional a la raíz cuadrada de la eslora, pues $p - d \simeq 1/2$. En el rango 20–30 pies, el kilo de velero se cotiza a unos diez dólares.

4 Física detrás de los exponentes

Hasta ahora me he limitado a hacer un examen estadístico de los datos "experimentales" que he recopilado en revistas viejas. Ahora sería bueno discutir, por lo menos parcialmente, la física que hay detrás de las relaciones que hemos visto.

Lo que más le llama la atención (la aterra, en realidad) a una persona que navega en un velero por primera vez es que el barco amenaza constantemente con darse vuelta. Esta inclinación o *escora* es normal: el viento que propele al barco lo inclina al mismo tiempo. La figura 8 muestra los momentos que actúan sobre el barco. El viento ejerce una fuerza sobre las velas que es proporcional a la superficie vélica y al coseno del ángulo de escora β (y al cuadrado de la velocidad del viento, por supuesto, pero ese factor no nos interesa ahora). El momento escorante, M_e, que ejerce esta fuerza horizontal es el producto de ella por el brazo de palanca y de vuelta por el coseno de β. El brazo de palanca es proporcional al alto del mástil, que podemos suponer también proporcional a la eslora del barco. O sea que

$$M_e \propto \cos^2(\beta) \times \text{eslora}^3, \tag{7}$$

donde para simplificar he supuesto que $s = 2$, aunque en realidad sabemos que es $\simeq 1{,}84$. El momento que tiende a enderezar, *adrizar*, el barco se llama momento adrizante, M_a, y es proporcional al lastre, o sea $\propto$ eslora^3,

[8] Los marinos son tradicionalmente supersticiosos. Por ejemplo, en los puertos argentinos nadie nombra impunemente a un navegante solitario cuyas iniciales son V. D. Cualquier superstición es indigna de un científico, pero debo hacer notar que el velero que se perdió hace poco en el Atlántico salió en su último viaje de un club que lleva precisamente ese nombre.

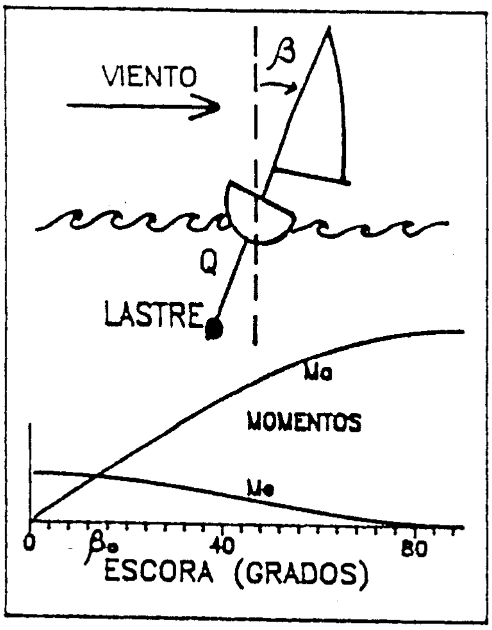


Figura 8: Momentos laterales que actúan sobre un velero, inclinándolo (M_e) y enderezándolo (M_a), en función del ángulo de inclinación (escora) β.

al brazo de palanca $Q \propto$ eslora^1, y al seno del ángulo de escora:

$$M_a \propto \sin(\beta) \times \text{eslora}^4. \tag{8}$$

El ángulo de equilibrio está dado por la solución de

$$\cos^2(\beta_0) = \sin(\beta_0) \times \text{eslora} \times C, \tag{9}$$

donde C es una función inversamente proporcional a la velocidad del viento. El ángulo de escora dado por la ecuación 9 es, a igual intensidad del viento, menor cuanto mayor sea la eslora del barco. Cuando el viento arrecia, las embarcaciones menores achican paño cuando las grandes están en su elemento. Esto, como nos muestra 9, es un efecto de escala y no depende de las habilidades de las tripulaciones de los barcos. Aquí se ve la gran ventaja de los razonamientos usando argumentos de escala: no necesitamos conocer C, que depende de los detalles del barco, para predecir ésto. Tampoco para saber que la solución de 9 es menor que 90^0: un velero lastrado no se puede tumbar.[9] Lo que endereza (*adriza*) al barco es el lastre que cuelga en su parte más baja. Hay otra manera pasiva[10] de adrizar: en la figura 8 supusimos

[9] Bueno, no debería. En realidad, sí puede. La solución de arriba es estática, la vida real, con ráfagas de viento, olas, y errores humanos, es dinámica.

[10] Las maneras activas exigen mover lastre o tripulantes hacia el lado de donde sopla el viento.

que el centro de empuje del agua sobre el casco permanecía fijo en la línea central del casco al escorar. Si este centro de empuje se desplaza hacia la derecha al escorar, produce otro momento adrizante *por forma* que depende directamente de la manga del casco y de alguna función rápidamente creciente de β que depende de la forma detallada del casco. Esta idea del adrizamiento por forma se la hemos copiado a los polinesios, y la aplicamos en los multicascos, catamaranes y trimaranes. Vimos arriba que el adrizamiento por lastre es progresivamente menos eficiente al disminuir la eslora, por inescapables motivos de escala. Si los veleros chicos quieren competir con los grandes en vientos fuertes, se ven obligados a aumentar sus mangas como medio de adrizamiento, llevando a $m < 1$, y por ende, restándole importancia al desplazamiento.

Hay que agregar otra tendencia moderna que reduce el desplazamiento de los barcos chicos: el precio de las amarras hace que muchos compradores demanden veleros que sean remolcables, y en este caso el peso no sólo no es necesario, es indeseable. Como los barcos grandes son irremolcables por livianos que sean, esta tendencia aliviana estadísticamente los barcos pequeños[5].

4.1 Propiedades dinámicas

Sí, por supuesto, normalmente vemos los veleros en regatas, en videos por televisión, o en *Hola*, en caso de que los timonee el rey Juan Carlos.

La velocidad con que navega un velero depende de cuánto viento sopla, y cómo se lo aprovecha. Pero cada barco tiene su límite, una velocidad máxima que se puede alcanzar en circunstancias ideales, pero no sobrepasar. Esta velocidad máxima es esencialmente una característica del casco, y en regatas en las que compiten barcos de distintos tipos, el tiempo que cada barco necesita para completar el circuito establecido se divide por el mínimo posible para ese barco. Este factor de corrección se llama *handicap*, y posibilita estas regatas mixtas. Así que cada barco compite consigo mismo, y suelen ganar barcos que entran a puerto cuando sus contrincantes ya se han tomado todo. De todas maneras, siempre hay un premio, la *cinta azul*, reservado para el que llega primero. Este es generalmente el barco más grande. A igualdad de otros factores, y si alcanza el viento, el barco más grande **tiene** que llegar primero.

Las razones físicas las explicó un arquitecto naval, William Froude, en el siglo pasado. A Froude le interesaba especialmente cómo las variaciones de tamaño de un barco influían en su velocidad, no por las regatas, sino porque quería estudiar el comportamiento de *modelos* de barcos en una pileta, antes de largarse a construirlos en serio. Este es un caso donde las ventajas económicas de pensar son evidentes.

La resistencia que opone el agua al desplazamiento de un barco tiene dos formas diferentes: el roce de la superficie del casco con el líquido, y la formación de olas. A velocidades grandes, las que interesan para transportar algo con provecho, la formación de olas es con mucho el factor más importante. Los submarinos son muy eficientes porque no forman olas.

Bien, Froude descubrió que en un problema en el cual intervenían energías cinética (el barco se mueve) y potencial gravitatoria (para crear las olas que frenan al barco hay que levantar agua), se encontraba una *semejanza dinámica* cuando la relación entre ambas energías era la misma. Por ejemplo, un barco experimenta una gran resistencia al avance cuando su velocidad v es igual a la de una ola cuya longitud es igual a la del barco, l. En esas circunstancias el barco se desplaza metido en el valle entre dos olas: adelante va la que crea con su proa, atrás la que produce su popa. Cuando uno divide las energías, se encuentra con que esto se produce cuando el cociente v^2/gl tiene un valor dado. Este cociente se llama hoy *número de Froude*:[11] todos los barcos se comportan dinámicamente igual cuando se mueven con el mismo número de Froude. Para ver cómo se va a comportar el modelo a escala 1/100, hay que probarlo a 1/10 de la velocidad, para mantener el número de Froude.

En problemas en que lo que importa es el roce, y no la formación de olas—si estuviésemos diseñando submarinos—lo que importaría sería otro número adimensional, más famoso aún: el de Reynolds.

Fíjese que el número de Froude es adimensional, y da lo mismo cualesquiera sean las unidades que se usen para medir velocidades, largos y aceleraciones, siempre que las unidades sean consistentes, por supuesto, pero si no lo fueran el número no saldría adimensional.

Cuando se remplazan los valores experimentales, se encuentra que la velocidad máxima de un velero, está dada por[1, 5]

$$v_{max} = 4,7\sqrt{l}. \tag{10}$$

Aquí l es la longitud del barco (en metros) sobre la línea de flotación, no la total que puede ser cualquier cosa si el barco lleva un botalón o punta hacia adelante. La fórmula da la velocidad en kilómetros por hora, aunque un marinero la expresaría en *nudos*.

[11] El número de Froude suele definirse como la raiz cuadrada de este que yo doy.

Puede haber una pequeña variación de barco a barco en la constante: en vez de 4,7 puede bajar hasta 4,2 para un patacho infame, o subir hasta 5,0 para un pura sangre de líneas depuradas. Pero esas diferencias son menores, el efecto grueso está en la raíz cuadrada de la longitud, y ése es físico, está dado por las leyes de transformaciones de escala, de semejanza dinámica.

Un velerito familiar, de seis metros de largo, es capaz de una velocidad máxima de unos 11 km/h, lo mismo que una persona trotando tranquila.

4.1.1 ¿Y porqué ese va mas rápido?

Si Ud. ha mirado veleros y tablas de windsurf en un lago, habrá visto que estas son mucho más rápidas, aunque son más cortas. No, no hay error. Los argumentos de Froude valen para monocascos de desplazamiento: las tablas no desplazan agua, sino que planean por arriba. Eso les permite alcanzar velocidades mucho mayores, pues una tabla de 4,5 m puede llegar a superar los 40 km/h con buen viento. Mucha velocidad, pero no pueden bajar a la cabina a tomar una ginebra cuando hace frío.

Las lanchas a motor también pueden ir mucho más rápido que cuatro coma siete por la raíz de su largo, porque tienen mucha fuerza bruta en su motor. Los veleros se manejan con viento e inteligencia, no con fuerza bruta.

5 Explicaciones y método

El lector puede idear sus propias explicaciones (las mías son, en realidad, especulaciones) para cada uno de los exponentes que he determinado. Estas explicaciones tienen dos etapas, que hemos transitado en este trabajo: en la primera, antes de medir, se trata de predecir, usando argumentos dimensionales, el valor aproximado del exponente; en la segunda, una vez que la evidencia nos ha demostrado que nuestro análisis predijo una aproximación aceptable, tratamos de explicar las diferencias.

Aunque ambas etapas son características de la investigación científica, pienso que la enseñanza tiende a olvidar la primera. Sin embargo, el hacer predicciones racionales sobre la solución de un problema antes de resolverlo es una excelente manera de desarrollar la intuición científica. Dije arriba que en este trabajo sólo he expuesto especulaciones, y además parciales. Excepto lo poco que he dicho sobre la velocidad máxima alcanzable por un velero, no he hablado sobre hidrodinámica, que es la tierra de Canaán del escaleo, ni de los materiales accesibles en cada época, sólo he mencionado al pasar los patrones estéticos subconscientes que pienso que están desempeñando un papel importante, no he considerado las reglas IOR[12] que actualmente influyen sobre las formas de muchos veleros.

Los exponentes que he encontrado reflejan probablemente la influencia de todas estas causas, más otras que se me escapan.

6 Conclusiones

Quisiera referirme aquí al método que he usado, y no al contenido en sí del trabajo, sobre el cual creo que ya he dicho todo lo que podía decir. En este artículo he sometido datos muy accesibles a un análisis matemático sencillo que sólo demanda gráficos log–log. La computadora que yo he usado no es necesaria, pues los exponentes en sí pueden encontrarse trazando a ojo las rectas que mejor se adaptan a los puntos. El análisis, más que matemático, es gráfico.

Hay innumerables conjuntos de cosas, naturales o hechas por el hombre, que se prestan a un tratamiento similar, que está al alcance de cualquier estudiante secundario que maneje el concepto de logaritmo. Si no lo maneja, esta clase de análisis brinda una buena ocasión para aprenderlo. En efecto, este estudio de escalas es una de las pocas aplicaciones que se me ocurren en que este concepto sea de importancia. Es un hecho que los logaritmos han sido totalmente desplazados como herramienta de cálculo por las calculadoras electrónicas. En una versión anterior de este artículo dije "un triste hecho," pero la verdad es que nadie que haya tenido que lidiar con las tablas de Hoüy lo lamentará. Como consecuencia de este cambio, muchos de los usos de los logaritmos que se enseñan en la escuela media están totalmente obsoletos. Pero si bien están obsoletos como herramienta de calcular, vemos que pueden ser inmejorables herramientas para *pensar*, una actividad que el cálculo puede apoyar, pero nunca suplantar.

Estamos acostumbrados a la meticulosa exactitud de los resultados que nos brinda la Física, y en este trabajo que Ud. acaba de leer no hay detalles exactos, sólo vagas tendencias generales expresadas por exponentes. Creo que el tratar de ver esas tendencias generales, prescindiendo de los detalles, hace a la Física lo que es, y le permite superar la simple taxonomía de, digamos, la Botánica[13]. Los exponentes que se hallan con este análisis expresan

[12] La International Offshore Rule, grupo de reglas que determinan los handicaps para regatas de altura. Ha sido una fuerza maléfica en el desarrollo de nuevos barcos.

[13] Esto lo expresó Lord Rutherford con esa arrogancia tan cara al corazón de un físico: "Sólo hay dos clases de ciencia, la Física y coleccionar estampillas."

relaciones, y su discusión lleva en general a una comprensión más profunda, menos anecdótica, del tema que se estudia.

No es casual que haya hecho tanto hincapié en el análisis gráfico de datos. El elaborar y estudiar dibujos nos obliga a usar y ejercitar facultades abarcativas, asociadas al hemisferio derecho del cerebro, que complementan poderosamente las analíticas en las cuales se concentra exclusivamente nuestra educación formal[6].

El estudio de escalas permite entonces abordar relaciones muy generales, no sólo náuticas, por lo cual es parte del equipaje conceptual de todo físico. Como hemos visto, no hay ninguna razón para que no lo usemos todos.

Referencias

[1] Alberto Enguix. *Curso de vela.* Publicaciones Médicas Argentinas, Buenos Aires, 1981.

[2] Peter Heaton. *Navegar a vela.* Instituto Parramón Ediciones, Barcelona, 1979.

[3] Prefectura Naval Argentina. *Manual de conocimientos marineros.* Prefectura Naval Argentina, Dirección del Personal, Buenos Aires, 1974.

[4] Howard I. Chapelle. *The History of American Sailing Ships.* W. W. Norton & Co., New York, sin fecha.

[5] Eric Hiscock. *Cruising under sail.* Oxford University Press, Oxfor, 1981.

[6] Linda VerLee Williams. *Aprender con todo el cerebro.* Ediciones Martínez Roca S. A., Madrid, 1986.

Si desea incorporarse a nuestro grupo de usuarios:

Si le interesa continuar recibiendo información sobre nuestras actividades y el material que vamos produciendo, escríbanos. Es muy importante recibir los comentarios y sugerencias de quienes han usado el material producido para mejorar y completar el que se produzca en el futuro. Hemos armado una base de datos de usuarios, a quienes mantenemos informados y actualizados de las novedades en nuestro programa. Para ser incluído en la base sólo necesita completar la encuesta que está al final de este cuadernillo (fotocópiela, así les puede dar otras a sus colegas), y enviarla a:

Dra. V. Grünfeld o Dr. E. N. Martínez
Centro Atómico Bariloche
8400 Bariloche, Río Negro

Reproducido por cortesía del
Consejo de Tecnología para la Producción
Provincia de Río Negro

Cuestionario

En estas páginas se ha tratado la aplicación práctica de estructuras matemáticas necesarias para analizar información cuantitativa en distintas áreas del conocimiento. Sus sugerencias respecto al tema nos servirán para mejorarlo y producir material relacionado con él. Gracias.

Nombre y dirección, teléfono:

Estudiante Profesor Otro

Nivel: Secundario Terciario Universitario

Carrera u orientación:

Establecimiento:

Aplicación: ¿Le parece que este material es de utilidad, inmediata o indirecta, en su actividad docente?

¿Puede sugerir **temas** para futuros talleres o publicaciones?

Enfoque y problemas: ¿Le parecen adecuados el enfoque y nivel que se han usado aquí?

¿Qué **mejoras o correcciones** sugiere?

¿Son necesarios más **problemas aplicados**, o mayores **discusiones teóricas**?

Material impreso: ¿Le interesaría recibir material impreso sobre esta clase de temas?

¿Le parece que la producción de **libros** sobre estos temas le sería de utilidad a Usted personalmente? ¿Y a otros docentes?

¿Conoce **material** que ya cubra adecuadamente estos temas?

Enviar a:

V. Grünfeld o E. N. Martínez
Centro Atómico Bariloche
8400 Bariloche