

Acreditación de Canales Hidrodinámicos de Uso en Modelación Naval

Accreditation of hydrodynamic channels in naval modeling

Jorge Freiria

Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.

e-mail: jfreiria@fing.edu.uy

En este trabajo se considera un Sistema de Calidad aplicado a un entorno específico, los Canales o Tanques de Ensayos Hidrodinámicos, siguiendo las directrices de la International Towing Tank Conference (ITTC), recogidas a su vez de la normativa internacional, y se centra en la evaluación de las incertidumbres en los resultados experimentales del ensayo hidrodinámico que se denomina Ensayo de Resistencia al Avance, y en la determinación de cuales variables son las que tienen mayor incidencia en dichos resultados.

Palabras clave: acreditación de canales hidrodinámicos, modelación naval.

This work considers a Quality System developed by ITTC, applied to Towing Tanks, focusing on uncertainties results from Hull Resistance Tests.

Keywords: Accreditation of hydrodynamic channels, naval modelling.

1. ACREDITACIÓN

La acreditación es el procedimiento mediante el cual un Organismo autorizado reconoce formalmente que una organización es competente para la realización de una determinada actividad de evaluación de la conformidad. Los organismos de evaluación de la conformidad son los encargados de evaluar y realizar una declaración objetiva de que los servicios y productos cumplen unos requisitos específicos. Los laboratorios de ensayo y de calibración, las entidades de certificación (de producto, de sistemas de gestión, de personas), las entidades de inspección, y los verificadores medioambientales son ejemplos de Organismos de Evaluación de la Conformidad.

En la mayoría de las áreas de actividad humana, especialmente en laboratorios, se han puesto en marcha sistemas de evaluación de la conformidad con objeto de conseguir un nivel técnico mínimo, empujados por la demanda de las Administraciones y los clientes. Un requisito previo para la igualdad

de condiciones en el comercio es que cualquier producto o servicio, aceptado formalmente en un país pueda, a igualdad de requisitos, circular libremente en otros países sin necesidad de verse sometido a nuevos ensayos, inspecciones o certificaciones. La acreditación, regulada y fiscalizada por organismos supranacionales garantiza que los organismos de evaluación de la conformidad de distintos países desempeñan su tarea de manera equivalente, generando la adecuada confianza que posibilita la aceptación mutua de resultados.

Bajo el esquema de las normas de Calidad, por ejemplo ISO 9000, se aplican los términos Certificación o Registro, que apuntan fundamentalmente a la transparencia de los procedimientos, tanto para el funcionamiento interno como en su relacionamiento externo. En cambio la Acreditación exige además un nivel de competencia en el desempeño de las actividades, lo que la diferencia de la Certificación o Registro. Un ejemplo es la norma ISO/IEC 17025 “Requisitos para la competencia del los laboratorios de ensayo y calibración”, la cual plantea requerimientos de un mayor grado de competencia técnica que incluyen la determinación de incertidumbres.

La Acreditación tiene beneficios para la Administración, pues pone a su servicio una organización especializada e independiente de los intereses del mercado que actúa en base a criterios exclusivamente técnicos. Pone a su disposición un valioso recurso, un conjunto de evaluadores de la conformidad que han demostrado su competencia técnica. También refuerza la confianza del público en los servicios básicos (laboratorios de salud pública, seguridad de alimentos, etc.). Para los evaluadores de la conformidad el beneficio de la Acreditación es la aportación que el logo “Acreditado” brinda como rasgo diferenciador en el mercado, siendo garantía de integridad y competencia, aumentando así las oportunidades comerciales. Actualmente es un requisito imprescindible en la mayoría de las actividades, siendo un requisito básico para poder brindar servicios de evaluación de conformidad, como calibración, certificación de sistemas de calidad, etc.

1.1. ACREDITACIÓN DE CANALES DE PRUEBA

Los Canales de Prueba utilizados para ensayos hidrodinámicos deben ser considerados como Laboratorios, donde se realizan ensayos con modelos físicos. Esto sugiere inmediatamente la incorporación de los mismos en un sistema de calidad y competencia específica, como lo declara por ejemplo la norma ISO 17025. Se comienzan ya a observar indicios de involucramiento con este aspecto del proceso de medición, forzados por un lado por la presión que se ejerce al implementar sistemas de calidad, y por otro lado por la necesidad de ajustar los márgenes de incertidumbre en las medidas para la validación de resultados de modelación realizadas en CFD.

El liderazgo de este proceso le ha correspondido a la International Towing Tank Conference (ITTC), que en la Conferencia No. 22 plantea formalmente la necesidad de la implementación de un sistema de calidad y estimación de incertidumbres en las medidas. Por intermedio de su Comité de Calidad establece una aproximación al tema a través de un documento aclaratorio sobre el alcance y términos relacionados con la evaluación de las incertidumbres en las medidas. Posteriormente, en la Conferencia 24^a, se invita y promueve la participación de los laboratorios miembros con el objetivo de profundizar la introducción del tema al seno de la organización. Se diseñó un ejercicio de intercomparación donde se dispondrán de dos escalas (Geosims) del modelo desarrollado en el David Taylor Model Basin (DTMB) DTMB 5415, con esloras de 5.720 m y 3.048 m respectivamente, los cuales serán utilizados por dos grupos de instituciones para su ensayo y análisis. El DTMB 5415 es un modelo que representa un moderno buque tipo “Combatant”, ampliamente utilizado para validación de códigos CFD y determinación de incertidumbres en EFD (Experimental Fluid Dynamics) seleccionado en Gothenburgo 2000 como banco de prueba (benchmark) para la validación de modelos numéricos (ITTC, 2002, 2005). Cada uno de los modelos completará un itinerario predeterminado que lo llevará por distintos laboratorios, comenzando por aquellos donde fueron construidos, siendo éstos el Canal de

Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) en el caso del modelo de eslora 5.720 m, y el CEHINAV de la ETSIN, para el modelo de eslora 3.048 m (ITTC, 2005).

2. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El cálculo de incertidumbres implica el conocimiento preciso del procedimiento de medida y las variables que serán medidas, las leyes físicas que rigen el fenómeno, etc. Este conocimiento debe estar acompañado por definiciones claras de los elementos involucrados; esta razón ha llevado a volcar grandes esfuerzos para establecer una terminología clara y universal.

2.1. DEFINICIONES

Las definiciones de términos relacionados con las medidas están desarrolladas en la norma ISO/IEC/OIML/BIPM (1984) “International vocabulary of basic and general terms in metrology” (VIM), mientras que los conceptos estadísticos surgen de la norma ISO 3534 “Statistics – Vocabulary and symbols” (ISO 1992,1999, 2006; AIAA, 1999; Schmid, 2000).

Mensurando: es el atributo sujeto a medición de un determinado fenómeno físico que se puede identificar y valorar. La identificación clara del mensurando y su descripción detallada desde el punto de vista de las variables que intervienen en su definición es uno de los principales puntos en cuestión. Una mala o deficiente definición puede llevar a hacer fracasar el procedimiento de medida.

Error: es la discrepancia entre una medida y el valor real del mensurando. Se asignan dos componentes a esta magnitud, una componente de naturaleza aleatoria que se denomina “error de precisión” asumiendo que existen variaciones impredecibles que afectan la medida, y otra que refleja otros aspectos de la medida que producen un sesgo y que normalmente se asocian a efectos no aleatorios, indicado como “error sistemático”.

Incertidumbre: duda, fluctuación, irresolución, inseguridad; en el caso de las medidas es aplicado en el sentido de la duda o falta de seguridad en la exactitud del resultado de la medición. Es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos al mensurando, refleja la falta de conocimiento exacto sobre el valor del mensurando.

Propagación de errores: muchas veces no se mide directamente la magnitud deseada sino otras variables que relacionadas entre sí a través de una ecuación de reducción terminan definiendo el valor buscado. La forma en que dichas incertidumbres afectan la medida final, se denomina propagación de errores, correspondiendo evaluar cada una de sus componentes.

2.2. TIPO DE ERRORS

El error se asume que está integrado por dos componentes, la primera asociada a desviaciones en los procedimientos de medida o “errores sistemáticos”, mientras que la restante se atribuye a innumerables aspectos que en forma aleatoria actúan durante el procedimiento, denominada “errores de precisión”.

Error sistemático: es la componente del error total debida a desviaciones o sesgos en el procedimiento de medida, como por ejemplo un corrimiento de la escala, influencia de unas magnitudes sobre otras, etc. Existen tres categorías de errores sistemáticos: asociados a la calibración del instrumento o sistema de medida, a la adquisición de datos y a la reducción de datos. Dentro de cada categoría pueden existir varias fuentes elementales que fuerzan la desviación sistemática. El valor total de la estimación del error sistemático se calcula utilizando la suma cuadrática denominada RSS (root

sum square). Por ejemplo, para la variable X_i existen j fuentes elementales de errores sistemáticos identificados por sus estimadores como $(B_i)_1, (B_i)_2, \dots, (B_i)_j$, con lo cual el error sistemático en la variable X_i puede calcularse como:

$$B_i = \sqrt{\sum_{k=1}^j (B_i)_k^2} \quad (1)$$

donde B_i es la estimación del error sistemático asociado a la variable X_i y $B_{i,k}$ son las estimaciones de los errores sistemáticos que aportan al error sistemático total; los valores $(B_i)_k$ deben ser estimados para cada variable X_i utilizando la información disponible en el momento.

Propagación de Errores Sistemáticos: la expresión general de la estimación de incertidumbre debido a la propagación de errores sistemáticos de las variables X_i en la medida experimental de la magnitud r definida como $r = r(X_1, X_2, \dots, X_k)$ está dada por la expresión

$$B_r = \left[\sum_{i=1}^k (\theta_i \cdot B_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde B_r es el error sistemático correspondiente a una magnitud experimental r y $\theta_i = \partial r / \partial X_i$ es denominado coeficiente de sensibilidad, describe qué tan sensible es el mensurando con respecto a las variaciones de la magnitud de entrada correspondiente.

Constantes o propiedades de materiales: los errores sistemáticos asociados a constantes se considerarán nulos puesto que dichos datos no generan incertidumbres. En el caso de propiedades de materiales que aparecen en las ecuaciones de reducción del fenómeno, cuando estas vienen dadas en tablas o curvas en función de alguna variable de definición, Se asumirá como error sistemático en este caso el propio error en la generación de dichos datos. En caso de no acceder a esta información, se deberá asumir algún criterio, como por ejemplo considerar la última cifra significativa indicada en los valores de la tabla.

Ecuaciones de calibración: la ecuación de calibración es una ecuación que relaciona una medida o valor de salida con la medida de una magnitud o valor de entrada:

$$X_k = f(y_1, y_2, \dots, y_N) \quad (3)$$

Esta ecuación debe ser tratada como una ecuación de reducción, por lo cual su tratamiento será similar al dado en la ecuación [2]:

$$B_i = \left[\left(\frac{\partial X_k}{\partial y_1} \cdot B_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial X_k}{\partial y_N} \cdot B_N \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Errores de precisión: los errores de precisión tienen su origen en una infinidad de circunstancias que provocan respuestas diferentes ante una misma medida; las causas siempre están presentes y no pueden ser soslayadas completamente. Incluyen al operador y su respuesta frente a cada medida, los instrumentos, las variaciones inherentes al suministro de energía, las condiciones ambientales que pueden producir variaciones en la respuesta de los instrumentos, etc.

Estimación de errores de precisión: se puede estimar el error de precisión en la medida r como:

$$P_r = t \cdot S_r \quad (5)$$

donde t es el límite de la variable normalizada para el intervalo de confianza establecido, conocido como factor de cobertura; para $N > 10$ se asume un valor $t = 2$ y S_r es la desviación estándar de la muestra de N lecturas.

Propagación de errores de precisión: se ha establecido con anterioridad que las fuentes de errores de precisión son difíciles de identificar y se refieren a distintos aspectos de la más diversa naturaleza; sin embargo se puede establecer que dichos errores tienen una distribución absolutamente aleatoria y gaussiana.

Suponiendo que se han identificado M fuentes de errores de precisión para la variable j ; la expresión general de la estimación de incertidumbre debido a la propagación de errores de precisión está dada por la siguiente expresión:

$$P_{j_i} = \left[\sum_{k=1}^M (P_j)_k^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

En los experimentos cuyos resultados se obtienen de un único ensayo, el límite de precisión de cada variable X_i debe determinarse. Para ello se tomarán en cuenta varios caminos: medidas repetidas, ensayos auxiliares, experiencia previa, estimación a partir de los datos de la escala, etc.

Cuando se realizan múltiples muestreos, se pueden determinar valores promediados de los M juegos de medidas $(X_1, X_2, \dots, X_j)_k$ en las mismas condiciones de experimentación, de donde se deduce

$$r = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=1}^M r_k \quad (7)$$

$$P_r = \frac{t \cdot S_r}{\sqrt{M}} \quad (8)$$

El límite del error de precisión del conjunto de muestras se transforma en siendo S_r la desviación estándar de la muestra

$$S_r = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{k=1}^M (r_k - r)^2 \quad (9)$$

3. CANALES DE PRUEBA: INCERTIDUMBRES EN MEDIDAS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA.

El ensayo de resistencia consiste en la conducción de un modelo en un canal de agua rectilíneo a una velocidad predeterminada, con la finalidad de determinar el valor de la resistencia al avance, componente horizontal de la fuerza que el fluido ejerce sobre la carena. A estos efectos la resistencia del modelo así como su velocidad deben ser medidas en forma simultánea (ITTC, 2002).

La medida del coeficiente de resistencia, expresión adimensional de la resistencia al avance, viene dada por la ecuación

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{1/2 \cdot \rho_M \cdot S_M \cdot V_M^2} \quad (10)$$

donde R_{TM} es la resistencia medida, ρ_M es la densidad del agua durante el ensayo, S_M es la superficie mojada del modelo y V_M la velocidad medida, corregida por bloqueo si corresponde.

La resistencia total puede ser considerada como la suma de dos componentes de distinta naturaleza:

1) resistencia residual asociada a los fenómenos de generación de olas, dependiente del número de Froude, cuyo cálculo se realiza utilizando la expresión

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \cdot (1 + k) \quad (11)$$

donde C_{TM} es el coeficiente de resistencia del modelo, C_F es el coeficiente de resistencia friccional dado por la Línea de Correlación modelo – buque adoptada por la ITTC en 1957, k es el factor de forma deducido por el método de Prohaska.

2) resistencia viscosa, derivada de los esfuerzos cortantes que genera el fluido en las regiones adyacentes con el casco, y cuya expresión actual es presentada por la ITTC:

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (12)$$

siendo $Re = (V_M \cdot L_M) / \nu_M$ el Número de Reynolds para las condiciones del ensayo, donde V_M es la velocidad del modelo, L_M es la eslora del modelo y ν_M es la viscosidad del agua.

Los ensayos se diseñan para una velocidad nominal V_{nom} , pero esta velocidad difícilmente sea conseguida en forma exacta en los ensayos, esperándose encontrar valores muy cercanos en una distribución normal que dependerá de la calidad del equipo, de la calibración del mismo y de la pericia del operador. Dado que en este ejercicio se debe comparar resultados para la velocidad nominal preestablecida, se deberá corregir la velocidad real V_M teniendo en cuenta que para pequeñas variaciones de la misma se puede considerar que el resistencia es proporcional al cuadrado de la razón entre velocidades (ITTC, 2002)

$$C_{TM}^{nom} = C_{TM} \cdot \left(\frac{V_{nom}}{V_M} \right)^2 \quad (13)$$

La ITTC establece además la necesidad de utilizar una temperatura normalizada para la presentación de resultados debido a la gran dependencia de la resistencia con la viscosidad (ITTC, 2002, 2005). En el caso de ensayos realizados para terceros, es recomendado normalizar a la temperatura media del conjunto, mientras que en ejercicios de comparación como el propuesto se corregirá a una temperatura normalizada de 15°.

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{RM} + C_{FM}^{15^\circ} \cdot (1 + k) \quad (14)$$

donde C_{RM} es la resistencia residual y $C_{TM}^{15^\circ}$, $C_{FM}^{15^\circ}$ son los coeficientes corregidos para la temperatura normalizada.

La resistencia friccional es dependiente de la temperatura, no así la componente de resistencia por formación de olas, que se calcula utilizando los datos como surgen de los ensayos corregidos para la velocidad nominal. La ecuación (14) se puede expresar de la siguiente manera teniendo en cuenta (11)

$$C_{TM}^{15^\circ} = C_{TM} + (C_{FM}^{15^\circ} - C_{FM}) \cdot (1 + k) \quad (15)$$

donde $C_{TM}^{15^\circ}$ es el coeficiente de resistencia total normalizado, $C_{FM}^{15^\circ}$ es el coeficiente de fricción dado por línea de correlación modelo – buque ITTC (1957) normalizado y k es el factor de forma deducido por el método de Prohaska (ITTC, 1978).

4. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE COEFICIENTES EN EJERCICIO DE INTERCOMPARACIÓN ITTC

En las Tablas 1 a Tabla 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos con el modelo DTMB 5415 en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas Navales (CEHINAV) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) participante del ejercicio de intercomparación propuesto por la ITTC.

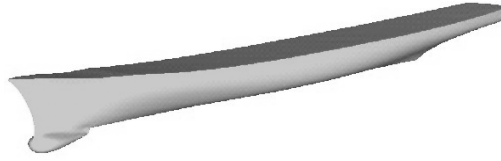


Fig. 1

Representación CAD de modelo DTMB 5415

Las tres primeras columnas representan los datos brutos obtenidos de los ensayos, mientras que en la columna 4 se muestran los valores de la resistencia al avance corregidos para la velocidad nominal, y finalmente en la última columna se transcriben los valores del coeficiente de resistencia normalizados para una temperatura de 15°. Una vez determinado el conjunto de los coeficientes, se procede a la depuración mediante la aplicación de métodos estadísticos (en negrita datos eliminados).

Tabla 1
Datos del Ensayo de Resistencia para Fr 0.10

R_X (gr)	V (m/s)	T (°)	$R_{X \text{ norm}}$ (gr)	$C_T^{15^\circ}$
95.6	0.54602	15.5	95.9	0.004580
96.1	0.54604	15.6	96.5	0.004610
101.2	0.54605	15.7	101.6	0.004855
98.8	0.54602	15.7	99.2	0.004742
99.1	0.54600	15.7	99.4	0.004754
103.4	0.54604	15.9	103.8	0.004967
99.4	0.54603	15.7	99.8	0.004770
99.3	0.54603	15.8	99.6	0.004766
98.2	0.54598	16.0	98.5	0.004719
104.5	0.54604	15.9	104.9	0.005018
102.8	0.54604	16.0	103.2	0.004939
101.9	0.54601	16.0	102.2	0.004894
93.6	0.54606	16.0	93.9	0.004499
99.8	0.54603	16.1	100.1	0.004797
97.0	0.54602	16.3	97.4	0.004670

Tabla 2
Datos del Ensayo de Resistencia (Fr 0.28)

R_X (gr)	V (m/s)	T (°)	$R_{X \text{ norm}}$ (gr)	$C_T^{15^\circ}$
860.3	1.52812	15.5	862.4	0.041080
866.4	1.52809	15.6	868.6	0.041380
862.9	1.52799	15.7	865.2	0.041220
864.1	1.52805	15.7	866.3	0.041272
866.8	1.52819	15.7	868.8	0.041392
870.9	1.52806	15.9	873.1	0.041604
865.0	1.52818	15.7	867.0	0.041308
865.9	1.52814	15.8	868.0	0.041358
867.6	1.52807	16.0	869.8	0.041446
866.2	1.52811	15.9	868.4	0.041377
870.0	1.52805	16.0	872.2	0.041563
873.8	1.52812	16.0	875.9	0.041741
866.2	1.52810	16.0	868.3	0.041378
876.6	1.52804	16.1	878.9	0.041884
863.4	1.52807	16.3	865.6	0.041260

Tabla 3
Datos del Ensayo de Resistencia (Fr 0.41)

R_X (gr)	V (m/s)	T (°)	$R_{X \text{ norm}}$ (gr)	$C_T^{15^\circ}$
2847.8	2.23716	15.5	2857.6	0.136091
2839.8	2.23716	15.6	2849.5	0.135712
2859.3	2.23734	15.7	2868.7	0.136629
2841.6	2.23746	15.7	2850.6	0.135766
2861.5	2.23737	15.7	2870.8	0.136730
2843.3	2.23743	15.9	2852.3	0.135858
2828.4	2.23699	15.7	2838.5	0.135193
2842.8	2.23721	15.8	2852.4	0.135858
2870.4	2.23693	16.0	2880.9	0.137221
2836.9	2.23687	15.9	2847.4	0.135623
2839.5	2.23708	16.0	2849.5	0.135724
2857.9	2.23721	16.0	2867.6	0.136587
2854.2	2.23696	16.0	2864.5	0.136442
2847.3	2.23717	16.1	2857.1	0.136092
2833.9	2.23725	16.3	2843.4	0.135450

4.1. ANÁLISIS DE ERRORES SISTEMÁTICOS

Para determinar la incertidumbre en el resultado de la resistencia al avance se deberá establecer el límite de los errores sistemáticos para el siguiente conjunto de variables: Eslora (L_M), Densidad (ρ), Superficie mojada (S_M), Viscosidad (ν), Velocidad (V_M), Coeficiente de Resistencia Viscosa (C_F), Resistencia (R_X), Coeficiente de Resistencia Total (C_T), Temperatura (T), Factor de Forma ($1+k$).

Eslora: se asume que en la confección del modelo se comete un error de ± 1 mm cuando la máquina de tallar el modelo en madera comienza el proceso, por ej. en el extremo anterior, y un error igual cuando termina en el extremo opuesto, debido a un error de posicionamiento del cabezal. El error sistemático será $B_{L1} = 2.000E-03$ m.

Superficie mojada: tendremos aportes debido a los errores transmitidos por el sistema de pesada del modelo generando un error en la estimación del desplazamiento, y por los errores cometidos en las dimensiones lineales que actúan en el mismo sentido, completando un error sistemático $B_S = 4.154E-03$ m².

Velocidad: la velocidad es medida a través de un tacómetro (encoder) acoplado directamente al sistema motriz del carro dinamométrico. Al no contar con datos actualizados del funcionamiento del mismo se manejaron datos de calibración del sistema, encontrando que los errores combinados de calibración y de la ecuación de reducción ($V = d / t$; d es la distancia y t el tiempo en recorrer dicha distancia) son los detallados en Tabla 4:

Tabla 4
Error sistemático de la velocidad

Número de Froude	B_V (m / s)
0.100	1.538E-03
0.280	1.553E-03
0.410	1.574E-03

Resistencia al Avance: La resistencia al avance se mide mediante una celda de carga que está conectada a través de un vínculo flexible directamente al modelo. En este caso aparecen componentes de error asociadas a la calibración de la propia celda y distintas fuentes en la adquisición de datos (desalineación de la celda de carga, conversión analógico – digital del equipo de medida y trimado del modelo). La composición de estos errores determina un error sistemático $B_R = 4.361E-02$ N.

Temperatura: se mide con un termómetro microprocesador que consiste en una sonda (termistor) calibrada. La sonda de temperatura se linealiza mediante un microprocesador incorporado en

el instrumento. El rango de medida es entre -50° y 150° , siendo su resolución 0.1° y su precisión $\pm 0.4^{\circ}$. Este valor es considerado como una estimación del error en este caso, siendo entonces $B_t = 4.000E-01^{\circ}$.

Densidad: se calcula de acuerdo a las tablas suministradas en el procedimiento de la ITTC “7.5-02-01-03. Density and Viscosity of Water”, cuyos valores se pueden representar por la correlación:

$$\rho = 1000.1 + 0.0552 \cdot t - 0.0077 \cdot t^2 + 0.00004 \cdot t^3 \quad (16)$$

donde t es la temperatura del agua del canal medida en $^{\circ}\text{C}$; una parte del error sistemático se asocia a la ecuación de reducción del fenómeno, mientras que la curva de ajuste de los datos experimentales aporta otra componente. Finalmente la estimación del error será $B_{\rho} = 7.816E-02 \text{ kg/m}^3$.

Viscosidad: análogamente como en el caso de la densidad, la viscosidad se calcula de acuerdo a las tablas suministradas en el procedimiento de la ITTC “7.5-02-01-03. Density and Viscosity of Water”, cuyos valores se pueden representar por la correlación:

$$\nu = (6.83E - 04 \cdot t^2 - 5.228E - 02 \cdot t + 1.768) \cdot 10^{-6} \quad (17)$$

donde t es la temperatura del agua del canal medida en $^{\circ}\text{C}$. Las componentes de error son conceptualmente equivalentes, completando en este caso un valor de $B_{\nu} = 2.001E-08 \text{ m}^2/\text{s}$.

Coeficiente friccional: se calcula mediante la ecuación 13, quedando el error limitado al asociado a la ecuación de reducción:

$$B_{C_F} = \left[\left(\frac{\partial C_F}{\partial V} \right)^2 \cdot B_V^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial L} \right)^2 \cdot B_L^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial \nu} \right)^2 \cdot B_{\nu}^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

siendo sus valores en función de la velocidad los mostrados en la Tabla 5:

Tabla 5
Error sistemático en el coeficiente de resistencia friccional

Número de Froude	B_{CF}
0.100	1.628E-05
0.280	1.189E-05
0.410	1.067E-05

Coeficiente de resistencia total: se calcula mediante la ecuación 10 y su error sistemático también se asocia a esta ecuación de reducción como en el caso anterior (Tabla 6):

Tabla 6
Error sistemático en el coeficiente de resistencia total

Número de Froude	B_{CT}
0.100	2.140E-04
0.280	3.322E-05
0.410	2.980E-05

Factor de forma: este factor fue estimado en forma experimental de acuerdo a lo establecido en ITTC, 1999; la ecuación de reducción de estos datos lleva a una estimación de su error sistemático mostrada en la Tabla 7:

Tabla 7
Error sistemático del factor de forma en $f(\text{Fr})$

Número de Froude	B_{1+k}
0.100	6.114E-02
0.238	3.820E-02
0.316	5.474E-02

Coeficiente de resistencia total: se calcula mediante la ecuación 16, y al igual que en los casos anteriores la estimación del error sistemático se asocia con esta ecuación de reducción, siendo sus valores los indicados en la Tabla 8:

Tabla 8
Errores sistemáticos para el Coeficiente de Resistencia Total Normalizado

Número de Froude	B_{CT15°
0.100	2.155E-04
0.238	3.819E-05
0.410	3.427E-05

4.2. ANÁLISIS DE ERRORES DE PRECISIÓN

Para la determinación de la resistencia al avance, las magnitudes registradas que muestran una variación aleatoria son la velocidad, resistencia y temperatura. Sin embargo, al corregir los valores experimentales a velocidades y temperaturas normalizadas, la única variable afectada por errores de precisión será la resistencia. Dado que se han realizado múltiples ensayos para cada velocidad, corresponde considerar como un experimento multivariable, en función de lo cual tendremos que el índice de precisión deberá ser calculado de acuerdo a la formulación establecida en las ecuaciones 8 y 9. El criterio adoptado para desechar observaciones fuera de rango fue considerar para su eliminación aquellas medidas que superaban en $\pm 2\sigma$ el promedio [0], eliminándose tres registros para $Fr = 0.28$ y uno para $Fr = 0.41$ (marcadas en negrita). En la Tabla 9 se detallan los resultados elaborados en base a los datos experimentales:

Tabla 9
Errores de precisión

Número de Froude	P_{CT15°
0.100	7.571E-05
0.280	9.007E-06
0.410	1.479E-05

4.3. INCERTIDUMBRES EN $C_T^{15^\circ}$

La incertidumbre asociada al coeficiente de resistencia total normalizado estará dada, de acuerdo al procedimiento seguido para los restantes cálculos, utilizando la media cuadrática (root sum square) de los errores sistemáticos y de precisión (

Tabla 10)

Tabla 10
Incertidumbre Total

Número de Froude	$C_{TM}^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$P_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$U_{CTM}^{15^\circ}$ (E-05)	% $C_{TM}^{15^\circ}$
0.100	4.772	21.55	7.571	22.94	4.81
0.280	5.317	3.819	0.9007	3.934	0.74
0.410	8.115	3.427	1.479	3.735	0.46

5. PROPAGACIÓN DE ERRORES: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Complementariamente a la estimación de incertidumbres se planteó la necesidad de tener por un lado un procedimiento automatizado que permita la evaluación de incertidumbres en tiempo real, y por otro contar con una herramienta que permita medir la influencia que tienen los errores de las distintas variables en el valor total, generando información útil para la mejora de procesos o instrumentos (Longo y Stern, 2005).

La idea básica de este procedimiento se puede explicar a través de la descripción del complejo sistema de variables que intervienen en un ensayo experimental y que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Un primer nivel está constituido por variables completamente independientes; en este grupo podemos distinguir variables ambientales que definen el entorno del

experimento, otras que determinan el marco dimensional, y finalmente aquellas que están involucradas con el ajuste del sistema de adquisición de datos y operación del sistema.

El conjunto de variables del primer nivel actúan determinando o condicionando las de nivel medio que son aquellas que han sido identificadas como responsables directas de la variación de la magnitud que se pretende medir.

Éstas últimas determinan el resultado del experimento o ensayo a través de un nivel superior o directamente en su incidencia en una ecuación de reducción, la cual es un modelo matemático desarrollado para cuantificar el fenómeno.

Esta ecuación de reducción surge normalmente de un proceso de análisis adimensional evaluado a la luz de datos experimentales. En estos casos, la determinación de incertidumbres en la medida resultante es una tarea de una alta complejidad, donde los errores asociados a la medición de las variables del nivel inicial se transmiten a las variables de registro, y la composición de incertidumbres de éstas últimas definen a través de la ecuación de reducción la incertidumbre del resultado final.

5.1. EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRES: ANÁLISIS EN “CASCADA”

La propuesta es utilizar el esquema descrito calculando los errores sistemáticos de las variables elementales o de nivel inicial, utilizando estos resultados para luego calcular los respectivos errores en las variables de registro, finalizando el proceso mediante el cálculo del error sistemático en la magnitud de control empleando los valores anteriores, todo a través de un proceso sistematizado de tal manera que una variación en algún valor inicial se refleje automáticamente en el resultado final.

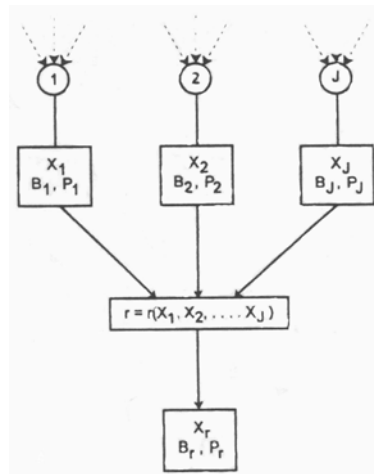


Fig. 2

Esquema de propagación de errores

Se describe a continuación el esquema propuesto aplicado al ensayo de resistencia, comenzando desde el nivel superior. El resultado del ensayo de resistencia es el coeficiente de resistencia normalizado $C_{TM}^{15^\circ} = f(C_{TM}, C_{FM}, C_{FM}^{15^\circ}, k)$. Este coeficiente está descrito por una ecuación de reducción en función de otras variables del ensayo, que representan el fenómeno físico, siendo éste el nivel superior del análisis de “cascada”. Cada una de los factores que intervienen en la ecuación anterior representa las variables del nivel medio: $C_{TM} = f_1(R_{TM}, \rho, S_M, V_M)$, $C_{FM} = f_2(Re)$, k (definido experimentalmente), las que dependen de las cantidades medidas o registradas: resistencia, densidad, etc. Finalmente estas últimas están determinadas por variables elementales que dependen de factores externos: del proceso de confección del modelo (L), de las condiciones ambientales, $\rho = f_3(T)$, $\nu = f_4$

(T), o de aspectos operativos como el sistema de adquisición de datos en el caso de R_{TM} o de la calibración del sistema de medición de velocidad V .

5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA ENSAYOS EN EL CEHINAV

Para mostrar como influye en los resultados la variación del error sistemático de una variable se ha escogido una velocidad de ensayo correspondiente al $Fr = 0.280$ como referencia, incluyendo cada vez las modificaciones comparadas con los valores determinados en los ensayos.

Los valores de los errores sistemáticos de las variables seleccionadas se modifican manualmente en el programa de cálculo. Utilizando el procedimiento de análisis en cascada se fuerza esos errores en dos situaciones opuestas, duplicándolos en primer lugar y luego reduciéndolos a cero. Los resultados de estas modificaciones se muestran a continuación en las Tabla 11 a

Tabla 17:

Tabla 11
Variación del Error Sistemático en la Eslora

B_L	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-03	0,28	5,317	3,819	0,72
2,00E-03	0,28	5,317	3,819	0,72
4,00E-03	0,28	5,317	3,819	0,72

Tabla 12
Variación del Error Sistemático en la Temperatura

B_T	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-03	0,28	5,317	3,628	0,68
2,00E-03	0,28	5,317	3,819	0,72
4,00E-03	0,28	5,317	4,344	0,82

Tabla 13
Variación del Error Sistemático en la Pesada del Modelo

B_w	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-01	0,28	5,317	3,723	0,70
2,62E-01	0,28	5,317	3,819	0,72
5,24E-01	0,28	5,317	4,085	0,77

Tabla 14
Variación del Error Sistemático en la Celda de Carga

B_{R1}	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-02	0,28	5,317	2,977	0,56
3,85E-02	0,28	5,317	3,819	0,72
7,70E-02	0,28	5,317	5,635	1,06

Tabla 15
Variación del Error Sistemático en la conversión Analógico – Digital del Adquisidor de Datos

B_L	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-02	0,28	5,317	3,603	0,68
2,04E-02	0,28	5,317	3,819	0,72
4,08E-02	0,28	5,317	4,406	0,83

En la Tabla 16 se muestran la aplicación del procedimiento descrito anteriormente para el caso en que simultáneamente se modifican dos parámetros para ver la influencia en conjunto:

Tabla 16
Variación simultánea Celda de Carga / Adquisidor de Datos

B_{R2}	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
NULO	0,28	5,317	2,694	0,51
COMBINADO	0,28	5,317	3,819	0,72
DOBLE	0,28	5,317	6,048	1,14

Tabla 17
Variación del Error Sistemático en la Velocidad

B_V	Fr	$C_T^{15^\circ}$ (E-03)	$B_{CT}^{15^\circ}$ (E-05)	$\%C_T^{15^\circ}$
0,00E-03	0,28	5,317	3,106	0,69
1,55E-03	0,28	5,317	3,819	0,72
3,10E-03	0,28	5,317	4,253	0,80

Analizando los datos presentados para las variaciones de errores sistemáticos y su incidencia en la incertidumbre total se puede establecer que la combinación de dos factores, la celda de carga y el adquisidor de datos, supone el factor más importante tener en cuenta en vistas a la limitación de la incertidumbre. Por su lado la variación del error en la temperatura, pesada del modelo y velocidad inciden en forma poco significativa, mientras que la variación en el error cometido en la determinación de la eslora es insignificante.

6. CONCLUSIONES

Fue presentada la evaluación de incertidumbres asociadas al coeficiente de resistencia en el ensayo de resistencia al avance para una instalación experimental involucrada en un ejercicio de intercalibración a nivel internacional. Se incluyeron aspectos básicos de las teorías y procedimientos involucrados en dicho cálculo.

Este trabajo pretende la difusión de las prácticas involucradas en la Acreditación de laboratorios experimentales e impulsar a los Canales de Prueba que no participan en instancias como la ITTC a incluirlas dentro de sus procedimientos.

Por otro lado se muestra la importancia que tiene para el operador la identificación de los errores sistemáticos, incluyendo las bases de un procedimiento automatizado que se ha denominado “análisis en cascada”, transformándose en una herramienta que no sólo permite determinar en tiempo real las incertidumbres asociadas para cada ensayo en particular, sino como un medio objetivo de identificación de los elementos de mayor debilidad del procedimiento o de la instalación para poder actuar sobre ellos y mejorar el sistema de medidas.

REFERENCIAS

- [1] Todd, F. H.; “Resistance and propulsion”; Principles of Naval Architecture; 1967
- [2] ITTC. 9th International Towing Tank Conference; “Proceedings; Decisions and Considerations” 725; Paris, Francia; 1960
- [3] ITTC. 17th International Towing Tank Conference; “Proceedings” 79 - 88; Gotenburgo, Suecia; 1984
- [4] ITTC. 18th International Towing Tank Conference; “Proceedings” 311 - 316; Kobe, Japón; 1987

- [5] ITTC. 19th International Towing Tank Conference; "Proceedings V1." 578 - 603; Madrid, España; 1990
- [6] ITTC. 20th International Towing Tank Conference; "Proceedings V1." 79 - 103; San Francisco, USA; 1993
- [7] ITTC. 21th International Towing Tank Conference; "Proceedings V1." 315 - 337; Trondheim, Noruega; 1996
- [8] ITTC. 22th International Towing Tank Conference; "Resistance Committee: Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC"; Seul, Japón; 1999
- [9] ITTC. 22th International Towing Tank Conference; "Sample Quality Manual"; Seul, Japón; 1999
- [10] ITTC 22nd. International Towing Tank Conference, "Resistance Committee Report", ITTC, 1999, Seoul, Corea
- [11] ITTC; QM Recommended Procedures "Performance, Propulsion; 1978 ITTC Performance Prediction Method"; 1999
- [12] ITTC. 23th International Towing Tank Conference; "Proceedings; Resistance Committee: Final Report and Recommendations" 17 - 87; Venecia, Italia; 2002
- [13] ITTC; QM Recommended Procedures "Testing and Extrapolation Methods; Resistance; Resistance Test"; 2002
- [14] ITTC; QM Recommended Procedures; "Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test"; 2002
- [15] ITTC. 24th International Towing Tank Conference; "Proceedings V1." 313 - 321; Edimburgo, Inglaterra; 2005
- [16] ITTC. 24th International Towing Tank Conference; "ITTC Worldwide Series for Identifying Facility Biases"; Edimburgo, Inglaterra; 2005
- [17] International Organization for Standarization; ISO/IEC PRF Guide 99 "International vocabulary of basic and general terms in metrology" (VIM); 1999
- [18] International Organization for Standarization; ISO 3534 – 1 "Statistics – Vocabulary and symbols"; 2006
- [19] International Organization for Standarization; ISO/TAG 4/WG3 : 1992; "Guide to the Expresion of Uncertainty in Measurement"; 1992
- [20] American Institute of Aeronautics and Astronautics; AIAA S-071 Standard; "Assessment of Wind Tunnel Data Uncertainty"; 1999
- [21] Schmid, W. A.; Lazos, R. J.; "Guía para estimar la incertidumbre de la medición"; CENAM, El Marquez, Qro., México; 2000
- [22] Coleman, H. W.; Steele, W. G.; "Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers"; John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.; 1999
- [23] Longo, J.; Stern, F.; "Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests with example for Surface Combatant DTMB model 5415"; Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 1; Marzo 2005
- [24] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) - Ministerio de Fomento (<http://www.cedex.es/>)
- [25] ENAC; "Acreditación, una herramienta al servicio de la Administración y de la sociedad"; información institucional; Entidad Nacional de Acreditación (<http://www.enac.es/>)
- [26] ENAC; "La Entidad Nacional de Acreditación"; información institucional; Entidad Nacional de Acreditación (<http://www.enac.es/>)
- [27] ENAC; "Laboratorios Acreditados: la necesidad de estar seguro"; información institucional; Entidad Nacional de Acreditación (<http://www.enac.es/>)
- [28] López González, L. A.; Perez Rojas, L.; "Estimación de la incertidumbre en la medida del hundimiento y trimado del modelo Serie 60"; Universidad Politécnica de Madrid, ETSIN; Madrid, España; Octubre 2002.
- [29] Cernuschi, F.; Greco, F. I.; "Teoría de errores de mediciones"; Editorial Universitaria de Buenos Aires; Buenos Aires, Argentina; Junio 1974.
- [30] Proyecto Bajel: Informe de los ensayos de resistencia realizados con el modelo de la carena del buque "Serie 60". Estudios de Incertidumbre; Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales, Canal de Ensayos Hidrodinámicos, ETSIN; Noviembre 2000.