

# ANÁLISIS VECTORIAL DEL EFECTO ESTELA WAKE EFFECT VECTORIAL ANÁLISIS

Por : F. J. Domínguez  
\*navser@porta.net

IPEN / LA HABANA 2003

## RESUMEN

En este artículo se presenta la formulación vectorial -VAWE, para determinar en una nave la influencia del efecto estela en la estimación de la potencia SHP. El análisis, considera el comportamiento de una línea de corriente del casco al ser influenciada por la velocidad del propulsor. En este análisis se incluye: inclinación de la línea de eje, número de propulsores, forma del casco en el sector del túnel y codaste, velocidad en el propulsor, velocidad de la nave, entre otros. Como resultado se obtiene la distribución teórica de la estela, el factor de corrección a la eficiencia del casco -FCC y la estimación de la potencia al eje efectiva SHP. Aun cuando el comportamiento de la capa límite es de notable importancia según el grado de rugosidad de las superficies, en este análisis no se la considera debido a que en la formulación de VAWE, se incluye como dato la potencia efectiva EHP.

## SUMMARY

This paper presents the vectorial formulation -VAWE, to determine the influence of the wake effect in order to estimate the power SHP. The analysis presented considers the behavior of a streamline from the hull when being influenced by the propeller speed. This analysis includes: inclination of the shaft line, number of propellers, hull forms in the sector of the tunnel and stern, speed in the propeller, speed of the ship, and so on. The result includes: the theoretical wake distribution, the hull efficiency correction factor - FCC and the estimate effective power shaft SHP. Even the boundary layer behavior is of remarkable importance according to the degree of ruggedness of the surfaces, in this analysis it has not been considered because in the VAWE formulation the effective power EHP is included as data.

- A. **INTRODUCCIÓN:** la influencia del efecto ESTELA en la estimación de la potencia del propulsor, ha sido un tema que por muchos años ha llevado a realizar todo tipo de investigaciones. Estos trabajos científicos han sido orientados a:
- a. tratar de estimar el efecto de la estela a partir de pruebas en modelos
  - b. tratar de extrapolar los resultados obtenidos con modelos, para aplicarlos en las naves a tamaño real
  - c. tratar de magnificar las variaciones del efecto estela obtenido en las pruebas con remolque y los resultados obtenidos con modelos autopropulsados.
  - d. Muchos estudios han realizado propuestas a las variaciones del efecto estela, atribuyendo a las variaciones de presión en el casco [2]
  - e. Otros estudios han recomendado considerar la inclinación de la línea propulsora, con formulaciones en términos cosenos, para mejorar la exactitud en la estimación del propulsor.
  - f. En [1], los investigadores del Canal de Experiencias de Italia: FELLI. M.; PEREIRA. F; CALCAGNO. G; DI FELICE F., han propuesto cuantificar el efecto de la estela, mediante la aplicación del método STEREO-PIV. Hasta la presente éste método aparece como el procedimiento más exacto para este efecto.

## B. ANÁLISIS DE UN PROPULSOR LIBRE

En el procedimiento clásico de dimensionamiento de un propulsor, se recurre en la práctica a realizar corridas de modelos para determinar la resistencia al avance, medir las presiones en el casco, conocer el comportamiento de las líneas de corriente tanto con modelos autopropulsados como al remolque.

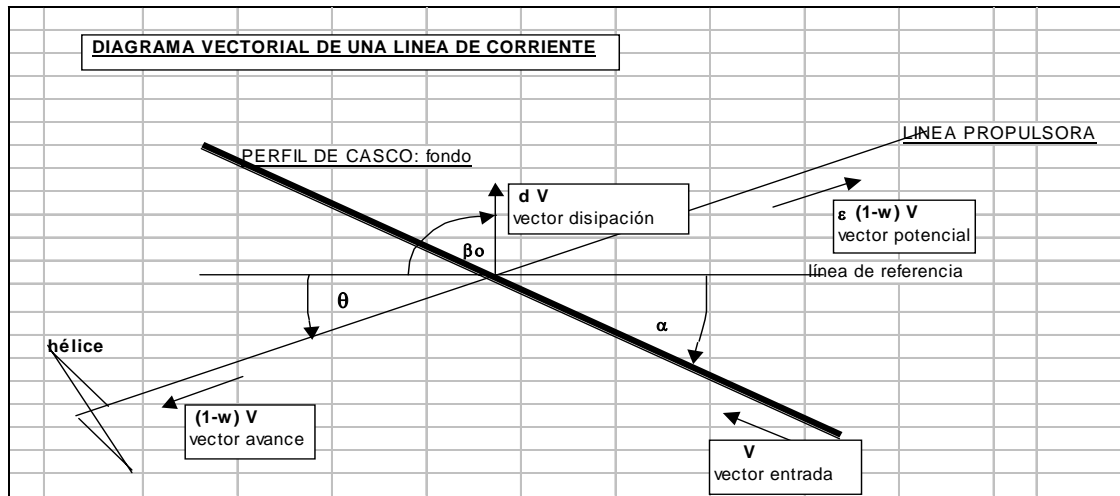
Si consideramos que al moverse una nave existe un conjunto de líneas de corriente que están siendo

desviadas al pasar a través del propulsor(es), estas líneas, por acción y reacción al movimiento, actuarán proporcionalmente en el área del disco de la hélice(s).

Por tanto, si se conoce por anticipado el número de propulsores a instalarse, se puede definir -para una línea de corriente, el esfuerzo de resistencia de una línea como:

$$\sigma_r = R / A \quad (1)$$

Esta consideración permite definir vectorialmente el comportamiento de una línea de corriente como se indica:



a. FORMULACION PROPUESTA – VAWE

Tomando como referencia el comportamiento de una línea de corriente, de masa  $m$ , de acuerdo con el principio de conservación de momentum se tiene:

$$d(m V) = F dt \quad (2)$$

$$V \cdot d(m) + m \cdot d(V) = F dt \quad (3)$$

Si se considera que  $d(V) = V_f - V_i$

$$\text{Siendo } V_f = (1-w) V \text{ y } V_i = V. \text{ Sustituyendo en} \quad (3)$$

$$V \cdot d(m) + m [(1-w) V - V] = F \cdot dt \quad (4)$$

Si  $V = dx / dt$  o  $dt = dx / V$ , la fórmula (4) queda:

$$V \cdot d(m) + m [(1-w) V - V] = F \cdot dx / V \quad (5)$$

El primer término de (5), nos indica que existe una variación en la masa de la línea de corriente analizada. Para esto, debemos definir esta variación como una fracción de la masa  $m$ , entre la condición inicial y final:

$$d(m) = m_f - m_i = d \cdot m \quad (6)$$

$$V \cdot d \cdot m + m [(1-w) V - V] = F \cdot dx / V \quad (7)$$

$$V^2 \cdot d \cdot m + V^2 (1-w) m - V^2 m = F \cdot dx \quad (8)$$

Esta última ecuación se puede re-escribir como:

$$\frac{1}{2} V^2 m = \frac{1}{2} V^2 \cdot d \cdot m + \frac{1}{2} V^2 (1-w) m - \frac{1}{2} F \cdot dx \quad (9)$$

La ecuación (9) es la expresión que se obtendría de la Ley de la Conservación de la Energía, y muestra que la energía cinética inicial de una línea de corriente es igual a: energía cinética de la masa que atraviesa el propulsor + energía cinética de la masa disipada – la energía potencial de reacción en el eje propulsor.

De la expresión (7) se puede despejar el término m, resultando:

$$V \cdot d + V (1-w) - V = F \cdot dx / (m \cdot V) \quad (10)$$

El término  $F \cdot dx / (m \cdot V)$ , puede ser expresado como una fracción del vector de avance  $(1-w) V$ , tal que:

$$F \cdot dx / (m \cdot V) = \varepsilon (1-w) V \quad (11) \text{ de donde}$$

$$V \cdot d + V (1-w) - V = \varepsilon (1-w) V \quad (12)$$

La ecuación (12) corresponde a la expresión vectorial del comportamiento de una línea de corriente, siendo  $V =$  vector velocidad.

### b. ANÁLISIS DE COMPONENTES VECTORIALES

Por simplicidad se considera el vector velocidad actuando en el plano  $X - Y$ .

Para esto se considera que la(s) línea(s) propulsora(s) esta(n) orientada(s) paralela(s) al plano de crujía.

La componente horizontal  $V_x$  será:

$$d \cdot V_x \cos(\beta_0) + (1-w) \cos(\theta) V_x = - V_x \cos(\alpha) + \varepsilon (1-w) V_x \cos(\theta) \quad (13) \text{ o}$$

$$d \cdot \cos(\beta_0) + (1-w) \cos(\theta) = - \cos(\alpha) + \varepsilon (1-w) \cos(\theta) \quad (14)$$

La componente vertical  $V_y$  será:

$$d \cdot V_y \sin(\beta_0) - (1-w) \sin(\theta) V_y = - V_y \sin(\alpha) - \varepsilon (1-w) V_y \sin(\theta) \quad (15) \text{ o}$$

$$d \sin(\beta_0) - (1-w) \sin(\theta) = - \sin(\alpha) - \varepsilon (1-w) \sin(\theta) \quad (16)$$

resolviendo las ecuaciones (14) & (16) se tiene:

$$(\varepsilon-1) (1-w) = [\cos(\alpha) + d \cos(\beta_0)]/\cos(\theta) = [-\sin(\alpha) - d \sin(\beta_0)]/\sin(\theta) \quad (17)$$

igualando las ecuaciones trigonométricas indicadas en (17), se tiene

$$\sin(\theta + \alpha) = -d \sin(\theta + \beta_0) \quad (18)$$

### c. MÁXIMA DISIPACIÓN d

De la expresión (18), se deduce la máxima disipación d. Para esto se debe derivar en función de  $\beta_0$ . Como resultado se obtiene:

$$d \cos(\theta + \beta_0) = 0 \quad (19)$$

$$(\theta + \beta_0) = 3 \pi / 2 \quad (20)$$

$$d = \sin(\theta + \alpha) \quad (21)$$

#### d. FACTOR DE AVANCE CORREGIDO

De la expresión indicada en (17) se deduce que para un máximo factor de disipación  $d$ , siendo  $\beta_0 = 3\pi / 2 - \theta$ , el factor de avance corregido está dado por:

$$(1-w)' = (\varepsilon-1) (1-w) = \cos(\theta + \alpha) \quad (22)$$

de esta expresión se tiene que el factor potencial de avance está dado por :

$$\varepsilon = 1 + \cos(\theta + \alpha) / (1-w) \quad (23)$$

De la expresión (23) se tiene que el factor potencial de la estela es independiente de la velocidad de la nave y solo está en dependencia de la inclinación de la línea de eje, del ángulo del perfil de codaste – túnel y el factor de estela  $w$  estimado,

#### e. FACTOR DE CORRECCIÓN A LA EFICIENCIA DEL CASCO –FCC

Por las consideraciones indicadas en el párrafo B.- la sumatoria de los efectos de una línea de corriente, desarrollará el empuje de un propulsor.

Por otro lado, la ecuación indicada en (9) se puede escribir en los siguientes términos de Energía Cinética:

$$\boxed{E \text{ avance} = E \text{ entrada} - E \text{ disipada}} \quad (24)$$

esto es:

$$\frac{1}{2} m (1-w)' V^2 = \frac{1}{2} m V^2 - \frac{1}{2} d m V^2$$

lo que indica que el avance efectivo de una línea de corriente está definido por el factor:

$$(1-w)' = (\varepsilon-1) (1-w) = \cos(\theta + \alpha), \text{ demostrado en (22)}$$

Una línea de corriente contribuye a la potencia efectiva EHP:

$$d \text{ EHP} = d R \cdot V \quad (25)$$

el empuje  $T$  generado será:

$$d T = d R / (1-t) \quad (26)$$

la potencia al eje SHP, para un sistema de acoplamiento directo (esto es: eficiencia del eje =1) será:

$$d \text{ SHP} = d T V_a / \eta \quad (27)$$

sustituyendo en las fórmulas anteriores se tiene:

$$d \text{ SHP} = d R V_a / [\eta (1-t)] \quad (28)$$

$$\text{si } V_a = V (1-w)'$$

$$d \text{ SHP} = d R V (1-w)' / [\eta (1-t)] \quad \text{o}$$

$$d \text{ SHP} = d R V (\varepsilon-1) (1-w) / [\eta (1-t)] \quad (29)$$

a partir de la definición indicada en (1), el término dR puede ser sustituido por:

$$d \text{ SHP} = (\sigma_r d A) V (\varepsilon-1) (1-w) / [\eta (1-t)] \quad (30)$$

en términos de la potencia efectiva EHP, la fórmula (29) quedaría:

$$d \text{ SHP} = (d \text{ EHP}) (\varepsilon-1) (1-w) / [\eta (1-t)] \quad (31)$$

de la expresión (31) se tiene que en la definición de la eficiencia quasi propulsiva se debe incluir un nuevo término, como un factor de corrección de la eficiencia del casco – FCC, por tanto:

$$\text{FCC} = (\varepsilon-1) = \cos(\theta + \alpha) / (1-w) \quad (32)$$

### C. ANÁLISIS DE UN PROPULSOR EN DUCTO

Una metodología similar a la indicada en VAWE, se puede aplicar para encontrar los efectos y beneficios de insertar un propulsor en un ducto.

Estas nuevas formulaciones salen del contexto de presentación del VAWE, por lo que puede ser continuada por cualquier persona interesada en este tema.

### D. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a. Tal como se ha formulado la metodología, se torna irrelevante estimar el factor de estela w, debido a que la eficiencia de casco corregida esta definida por:

$$\eta_h = (1-t) / \cos(\theta + \alpha) \quad (33)$$

- b. Siendo  $\theta$  el ángulo de inclinación de la línea propulsora y debido a que este valor se mantiene constante, es de mucha importancia conocer los valores del ángulo  $\alpha$  en el sector proyectado del disco propulsor al casco.
- c. Para los casos en los que se dispone de un programa de estimación de la potencia al eje, se recomienda corregir los resultados con el FCC, indicado en (32)
- d. De las formulaciones propuestas anteriormente, se puede apreciar que al usar los resultados de las pruebas de remolque y las series de diseños de propulsores en aguas abiertas, se debe tener presente las formas del casco en la entrada de agua al propulsor(es). Ángulos del casco  $\alpha$  muy altos, hará que la potencia efectiva desarrollada por la hélice(s), sea muy pobre.

### E. NOMENCLATURA

$\theta$ =	inclinación de la línea propulsora y vector de la velocidad de avance
$\alpha$ =	ángulo de entrada del vector velocidad de la línea de corriente, antes de ser influenciada por el propulsor,
$\beta_0$ =	ángulo de salida de la masa disipada
$V$ =	velocidad de la nave
$w$ =	factor de estela
$d$ =	factor de disipación con dirección $\beta_0$
$d m$ =	masa disipada con dirección $\beta_0$
$(1-w) V$ =	velocidad teórica de avance a través del propulsor
$(1-w)' V$ =	velocidad efectiva de avance por efecto del propulsor
$(1-w)' V$ =	$(1-w) (1-\varepsilon) V$
$\varepsilon$ =	factor potencial de la estela
$R$ =	resistencia al avance

$EHP = R V$	potencia efectiva al remolque
$\eta =$	eficiencia del propulsor tras del casco
$t =$	factor de deducción de empuje
$FCC =$	factor de corrección a la eficiencia del casco
$SHP =$	potencia al eje
$SHP = Pe / [\eta(1 - t)]$	
$m =$	masa de una línea de corriente, de longitud L
$m = \mu L$	
$L =$	longitud de la línea de corriente en consideración
$\mu =$	masa unitaria de una línea de corriente
$\mu = \rho A$	
$A = 0.25 \pi d^2$	área de una línea de corriente de diámetro d
$d =$	diámetro de una línea de corriente
$\sigma_r = R / A$	esfuerzo de resistencia de una línea de corriente

## F. BIBLIOGRAFÍA

1. FELLI. M.; PEREIRA. F; CALCAGNO. G; DI FELICE F., **APPLICATION OF STEREO-PIV: PROPELLER WAKE ANALYSIS IN A LARGE CIRCULATING WATER CHANNEL**, INSEAN ( Italian Ship Model Basin) 2002
2. DYNE GILBERT, **A STUDY OF THE SCALE EFFECT ON WAKE, PROPELLER CAVITACION AND VIBRATORY PRESSURE AT HULL OF TWO TANKER MODELS**, SNAME TRANSACTION 1974
3. NARITA H.; KUNITAKE Y.; YAGI H., **APPLICATION AND DEVELOPMENT OF A LARGE DUCTED PROPELLER FOR THE 280,000- DWT TANKER MS THORSAGA**, SNAME TRNSACTION 1974
4. OOSTERVELD M.W.C., DR.IR., **WAKE ADAPTED DUCTED PROPELLERS**, PUBLICATIONS N°345, NETHERLANDS SHIP MODEL BASIN, WAGENINGEN - NETHERLANDS