



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE DEFENSA

SECRETARÍA DE ESTADO DE DEFENSA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE SISTEMAS NAVALES



INSTITUTO NACIONAL DE
TECNICA AEROSPAZIAL



CEHIPAR CENTRO
DE EXPERIENCIAS
HIDRODINÁMICAS
DE EL PARDO

CAMPUS DE EL PARDO

PROYECTO APHRES. I+D+i

ENSAYOS EN EL CANAL DE AGUAS TRANQUILAS



Informe: OTI 2501-FASE 02.

Tipo de artefacto: Rodillos giratorios

Carena: 2948

Cliente: CARLOS ARCUSIN

Fecha: 29 noviembre 2021

PÁGINA

INTENCIONADAMENTE

EN BLANCO

ENSAYOS EN CANAL DE AGUAS TRANQUILAS

Cliente:

CARLOS EDUARDO ARCUSIN
 Carmen Puch, 1000
 1639 - Buenos Aires
 Argentina

E-mail: carlosarcusin@yahoo.com

Desarrollado por:

INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROSPACIAL “ESTEBAN TERRADAS” (INTA)
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE SISTEMAS NAVALES (SGSN)
Centro de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR)
 Carretera de la sierra s/n, 28 048 El Pardo, Madrid.
 Tel: +34 913 762 100
 Persona de contacto: Ramón Quereda
 E-mail: queredalr@inta.es

Instalación/Departamento:

<input checked="" type="checkbox"/>	Canal de aguas tranquilas
<input type="checkbox"/>	Canal de dinámica del buque
<input type="checkbox"/>	Túnel de Cavitación
<input type="checkbox"/>	Pantano (Valmayor)
<input type="checkbox"/>	CFD
<input type="checkbox"/>	Otros:

Elaborado por:

(RQ) Ramón Quereda / Jefe de Área

Revisado por:

(RQ) Ramón Quereda / Jefe de Área

Aprobado por:

(FP) CN (CIA) Francisco J. Pérez Villalonga / Subdirector General de Sistemas Navales

PÁGINA

INTENCIONADAMENTE

EN BLANCO

CONTROL DE REVISIÓN DOCUMENTAL

REVISIÓN	ELABORADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR	FECHA	TOTAL DE PÁGINAS	PAGINA AFECTADAS
00	RQ	RQ	FP	diciembre de 2021	35	TODAS
			PEREZ VILLALONGA FRANCISCO JAVIER 41496111V <small>Firmado digitalmente por PEREZ VILLALONGA FRANCISCO JAVIER 41496111V Fecha: 2021.12.01 14:38:10 +01'00'</small>			

LISTA DE DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO

INTA – CEHIPAR	EXTERNA
CN Francisco J. Pérez Villalonga (FP) Ramón Quereda (RQ) Patricia Díaz (PD)	Carlos Arcusín Jorge Aguado

Este documento es confidencial y propiedad de INTA - CEHIPAR. Cualquier copia total o parcial del documento es igualmente confidencial, no pudiéndose reproducir sin la autorización expresa de INTA-CEHIPAR.

This document is a property of INTA - CEHIPAR. Any copy generated from this document is confidential and neither shall be used to any different purpose that it has been requested nor could be reproduced, copied or communicated to any person without permission of INTA - CEHIPAR.

Si una persona distinta de las autorizadas encuentra este documento, debe remitirlo conjuntamente con su nombre y dirección, dentro de un sobre cerrado a la siguiente dirección postal:

If any other person distinct the authorized holder founded this document should send it, together with his name and address, inside a sealed envelope to the following postal address:

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial E. Terradas (INTA)

Subdirección General de Sistemas Navales (SGSN)

Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR)

Carretera de la Sierra s/n

28 048 El Pardo – Madrid

ESPAÑA – SPAIN

Tel. +34 913 762 100

PÁGINA

INTENCIONADAMENTE

EN BLANCO

ÍNDICE

1. INTRODUCCION	8
2. CARACTERISTICAS DE LOS CILINDROS	8
3. CARACTERISTICAS DEL SOPORTE	9
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	9
5. ENSAYOS REALIZADOS	10
5.1 UN SOLO RODILLO.....	11
5.1.1. TRINCADO.....	11
CONDICIONES DE LOS ENSAYOS E-21844 Y E-21846.....	11
• RESULTADOS DE LOS ENSAYOS E-21844 y E-21846	12
5.1.2. GIRANDO.....	14
CONDICIONES DE LOS ENSAYOS E-21843 y 21845.....	14
• RESULTADOS DE LOS ENSAYOS E-21843 y E-21845	15
5.1.3. COMPARACIONES.....	17
5.2. LOS DOS RODILLOS CON EL MISMO CALADO	19
5.2.1. SEPARACION 15%D, 575 mm.....	19
CONDICIONES DEL ENSAYO E-21842	19
• RESULTADOS DEL ENSAYO E-21842	20
5.2.2. SEPARACION 25%D, 625 mm.....	22
CONDICIONES DEL ENSAYO E-21841	22
• RESULTADOS DEL ENSAYO E-21841	23
5.2.3. COMPARACIONES.....	25
5.3. LOS DOS RODILLOS CON DIFERENTES CALADOS.....	26
5.3.1. SEPARACION 15%D, 575 mm.....	26
CONDICIONES DEL ENSAYO E-21839	26
• RESULTADOS DEL ENSAYO E-21839.....	27
5.3.2. SEPARACION 25%D, 625 mm.....	29
CONDICIONES DEL ENSAYO E-21840	29
• RESULTADOS DEL ENSAYO E-21840	30
5.3.3. COMPARACIONES.....	32
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	33
7. CONCLUSIONES	35

1. INTRODUCCION

El presente documento, continuación del informe OTI 2501, fase 01, contiene la información referente a los ensayos realizados para el proyecto APHRES en las instalaciones del INTA-CEHIPAR, ubicadas en El Pardo (Madrid), con dos cilindros de numeración, 2948-Pr y 2948-Pp, correspondientes a dos rodillos giratorios, proyecto de Investigación y Desarrollo promovido por Carlos Arcusín.

El objetivo de este trabajo de Investigación y Desarrollo es la generación de energía mediante dos cilindros que giran sincronizados con la condición de que la velocidad tangencial de ambos rodillos sea igual a la velocidad de la corriente de agua.

El fundamento teórico de este proyecto de I+D+i viene determinado por los principios de Arcusín.

Como consecuencia de una reunión, vídeo-conferencia, el cliente decidió realizar todos los ensayos con el cilindro de popa trincado, es decir, sin girar.

2. CARACTERISTICAS DE LOS CILINDROS

Rodillos: 2948-Pr y 2948-Pp

Material de los rodillos: PVC

Factor de escala: 10.00

Diámetro: 500.0 mm

Anchura: 500.0 mm

Situación I: Cilindro de proa sólo. Calado: 150.0 mm y calado 125.0 mm.

Situación II: Calado: 150.0 mm en ambos rodillos.

Situación III: Calado: 150.0 mm en el rodillo de popa y 125.0 mm en el de proa.

Separación entre ejes: 575.0 y 625.0 mm



Figura 1. Cilindros. 2948-Pr y 2948-Pp.

Los rodillos empleados, con los contornos redondeados por medio de un radio de acuerdo de 16 mm, recibieron una capa de imprimación y, posteriormente, fueron pintados con pintura impermeable y sellados para evitar la entrada de agua al interior de los cilindros durante la realización de los ensayos.

3. CARACTERÍSTICAS DEL SOPORTE

Para el desarrollo de los ensayos se procedió al proyecto de una estructura, soporte, en la que pudieran situarse los rodillos que, accionados por sendos motores sincronizados, girasen con la misma velocidad angular. El esquema se presenta en la figura 2.

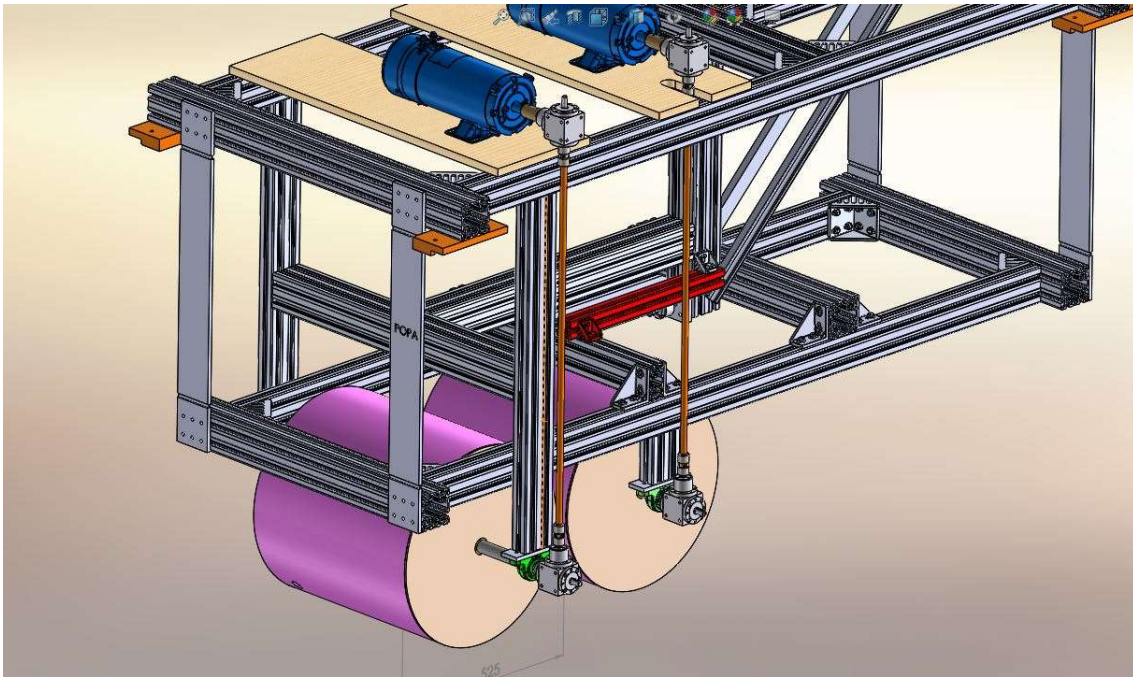


Figura 2. Esquema de la disposición de los rodillos giratorios.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El método utilizado se fundamenta en los principios de Arcusín, siendo la condición más restrictiva la velocidad sincronizada que consiste en la necesidad de que los cilindros giren a la misma velocidad con la característica de que la velocidad de cualquier punto de la periferia coincida con la velocidad de la corriente, en este caso, la velocidad del carro remolcador.

Primer Principio de Arcusín. Un cuerpo de revolución que se mueve a través de la interfaz agua-aire, sumergido el 30% de su diámetro, girando a la llamada “velocidad rotacional sincronizada” con la velocidad de avance, produce que la resistencia de fricción, prácticamente, desaparece con lo que la resistencia total disminuye con respecto de la que experimenta cuando no gira.

Segundo Principio de Arcusín. Cuando dos cuerpos de revolución avanzan y giran a la “velocidad rotacional sincronizada”, parcialmente sumergidos en la interfaz agua-aire, a una distancia mínima de 5% de su diámetro, el cilindro que va aguas arriba, cilindro de proa, no presenta resistencia de fricción y recibe un empuje que disminuye a medida que aumenta la separación entre los cilindros.

Con objeto de optimizar este segundo principio de Arcusín, se ha considerado la posibilidad de que el calado de ambos rodillos sea diferente. Para ello, se han realizado ensayos con ambos cilindros a distinto calado, 30 %D en popa y 25%D en el cilindro de proa, además de los ensayos con ambos cilindros al mismo calado, 30%D.

5. ENSAYOS REALIZADOS

En esta segunda fase del proyecto de Investigación y Desarrollo, se realizaron varias pruebas.

En primer lugar, utilizando exclusivamente un rodillo, para verificar el primer principio de Arcusín, se midió la resistencia en dos condiciones.

1. Rodillo quieto, trincado, variando la velocidad del carro.
2. Rodillo girando a velocidad sincronizada. Se varía la velocidad del carro.

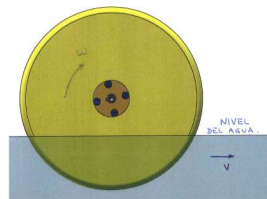


Figura 3. Cilindros. 2948-Pr.

En segundo lugar, con los dos cilindros a diferentes distancias de separación.

1. Ambos cilindros al mismo calado.

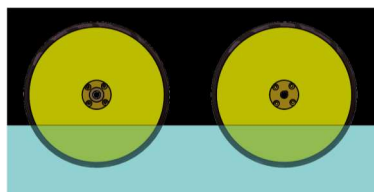


Figura 4. Cilindros. 2948-Pr y 2948-Pp.

2. El cilindro de proa con menor calado.

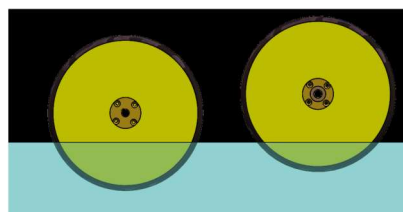


Figura 5. Cilindros. 2948-Pr (125mm) y 2948-Pp (150mm).

5.1 UN SOLO RODILLO

Con objeto de verificar el primer principio de Arcusín, se ha realizado un ensayo con un solo cilindro a diferentes velocidades de avance con dos consideraciones. Cilindro trincado, sin girar, para conocer la resistencia total y cilindro girando a la velocidad sincronizada, para evaluar la disminución de la resistencia de fricción. Para confirmar este principio, se realizaron ensayos con diferentes calados.

5.1.1. TRINCADO.

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, hasta alcanzar el valor de 1,40 m/s, para poder interpolar los valores de 4 nudos a 8 nudos, a escala real, de acuerdo con la escala de lo rodillos.

CONDICIONES DE LOS ENSAYOS E-21844 Y E-21846

Cilindro 2948-Pr

E-21844. Calado: 150.0 mm

E-21846. Calado: 125.0 mm

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, es decir, 0,80 m/s; 1,0 m/s; 1,20 m/s y 1,40 m/s, para abarcar las velocidades solicitadas por el cliente, las correspondientes a 4.00 nudos (0.6507 m/s); 6.00 nudos (0.9761 m/s) y 8.00 nudos (1.3015 m/s). Nudos para escala real, (m/s) para el modelo.

Cilindro trincado. Velocidad de giro 0.0 rad/s

$$\omega = 0.0$$

Siendo, V, velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente.

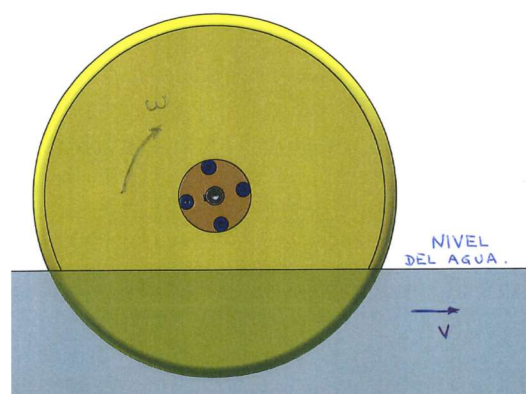


Figura 6. Velocidad rotacional cero. Rodillo trincado.

Con objeto de conocer la resistencia de un rodillo aislado, cuando avanza a una determinada velocidad, se han realizado dos ensayos de remolque con el cilindro trincado, es decir, sin girar, considerando dos calados diferentes, 30%D, es decir, 150.0mm, y 25%D, o sea, 125.0mm, barriendo una amplia gama de velocidades, entre 0,60 m/s y 1,40 m/s.

• **RESULTADOS DE LOS ENSAYOS E-21844 y E-21846**

Durante la realización del ensayo se midieron, para cada velocidad, la velocidad del carro y la resistencia al avance ofrecida por el modelo, cilindro 2948-Pr.

Para medir la resistencia, se utilizó la misma célula de carga empleada en los restantes ensayos, que permitía registrar la resistencia total que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 1, acompañado de una gráfica, figura 7, con la representación de los valores de la resistencia (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Resistencia E21844	E21844	0,3366	0,5527	0,9293	2,0015	3,6885
Resistencia (kg) E21846	E21846	0,2352	0,4068	0,7692	1,6629	2,9949

Tabla 1. Resistencia del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

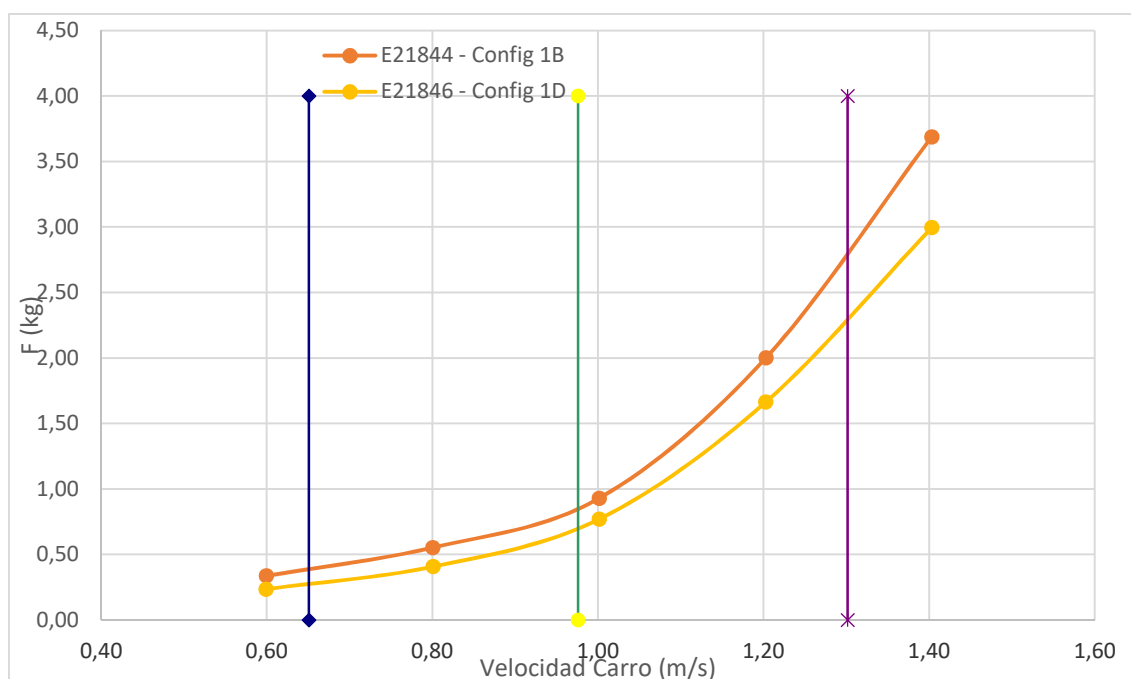


Figura 7. Resistencia del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en m/s

E-21844. Calado 30%D, 150.0 mm. E-21846. Calado 25%D, 125.0 mm.

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

La tabla 1 que presenta los valores medidos, rodillo trincado, define la variación de la resistencia que va aumentando con la velocidad.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941,9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor 941,9/500, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Resistencia (kg)	E21844	0,6341	1,0412	1,7506	3,7701	6,9484
	E21846	0,4430	0,7664	1,4491	3,1326	5,6417

Tabla 2. Resistencia total, trincado, del cilindro, corregido para una anchura de 941.9 mm.

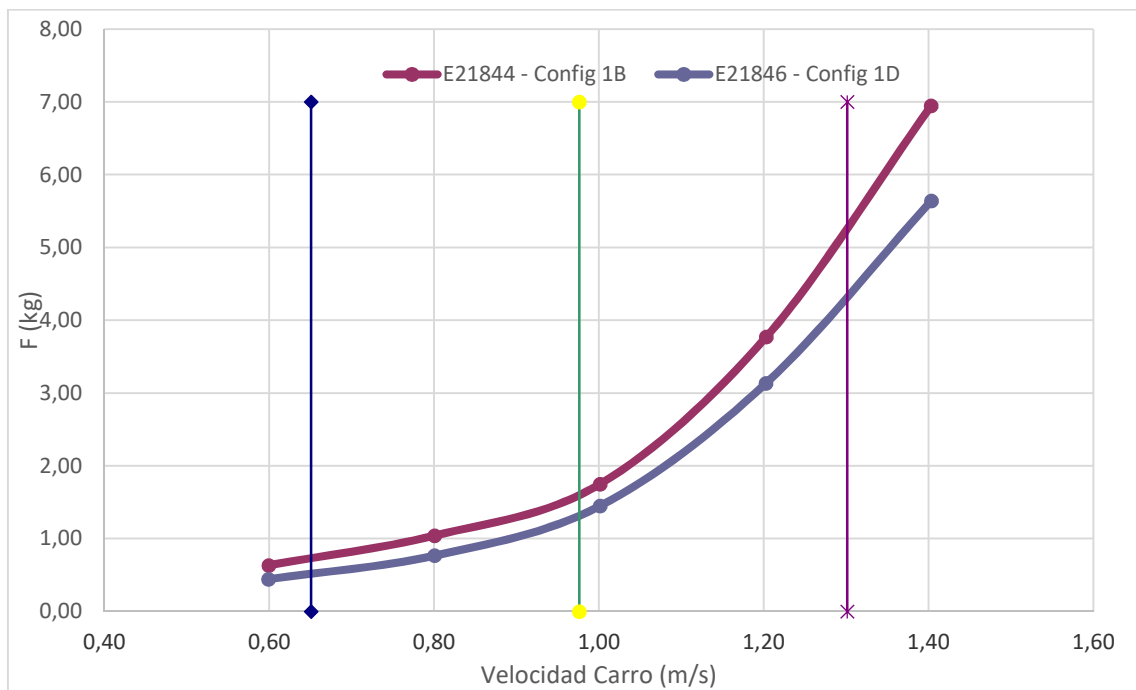


Figura 8. Estimación de la resistencia del rodillo de proa, para una achura de 941.9 mm

E-21844. Calado 30%D, 150.0 mm. E-21846. Calado 25%D, 125.0 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa del cilindro, cuya longitud aumentaba, al incrementar la velocidad del carro, así como era mayor al calado del 30%D.

5.1.2. GIRANDO.

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, hasta alcanzar el valor de 1,40 m/s, para poder interpolar los valores de 4 nudos a 8 nudos, a escala real, de acuerdo con la escala del rodillo.

El rodillo estaba forzado a girar a la velocidad sincronizada para cada velocidad del carro durante el ensayo.

CONDICIONES DE LOS ENSAYOS E-21843 y 21845

Cilindros 2948-Pr

E-21843. Calado: 150.0 mm

E-21845. Calado: 125.0 mm

Debido a los resultados obtenidos en la fase 1, se deduce que el máximo empuje del cilindro de proa se obtiene a velocidades próximas a 1 m/s para el modelo, es decir, 6 nudos para el caso real de acuerdo con la escala $\lambda = 10$ seleccionada.

Como consecuencia de ello, y para enfatizar la zona de máximos valores del empuje, se han analizado 5 valores de la velocidad en torno a la velocidad de 0.9761 m/s correspondientes, exactamente a 6 nudos del caso real.

La velocidad de giro del cilindro fue establecida de acuerdo con la condición de la "velocidad rotacional sincronizada".

$$V = \omega R$$

Siendo, V , velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente, R , radio del cilindro, (m), ω , la velocidad de giro del cilindro, (rad/s).

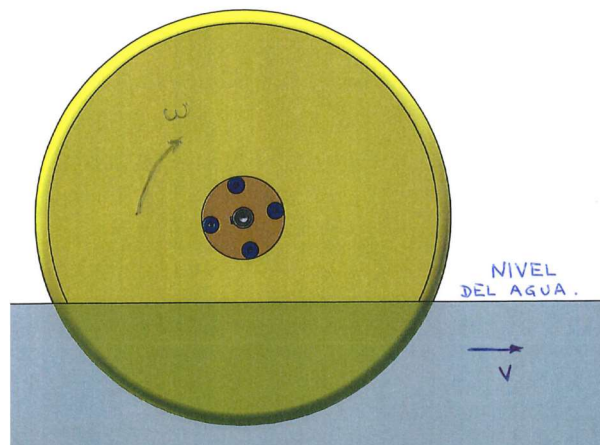


Figura 9. Velocidad rotacional sincronizada.

El sentido de giro del rodillo queda determinado con la condición de "rodar sin deslizarse", es decir, el vector de la velocidad del punto más bajo del cilindro ha de ser igual y de sentido opuesto al vector velocidad del carro.

Ello implica que la aceleración angular del rodillo es nula.

• **RESULTADOS DE LOS ENSAYOS E-21843 y E-21845**

De acuerdo con el enunciado del primer principio de Arcusín, el cilindro fue sumergido a dos calados diferentes, 25% del diámetro, 125mm de inmersión y el 30%D, es decir, 150 mm de calado.

Durante la realización de los ensayos se midió, para cada velocidad, resistencia, velocidad del carro y la velocidad de giro del rodillo.

Para medir la resistencia se colocó una célula de carga en el cilindro de proa, que permitía registrar la fuerza que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 3, acompañado de una gráfica, figura 10, con la representación de los valores de la resistencia (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)		0,925	0,950	0,975	1,000	1,025
Resistencia (kg)	E21843	0,4412	0,4767	0,5171	0,5912	0,6781
	E21845	0,3296	0,3613	0,4151	0,4818	0,5614

Tabla 3. Resistencia del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

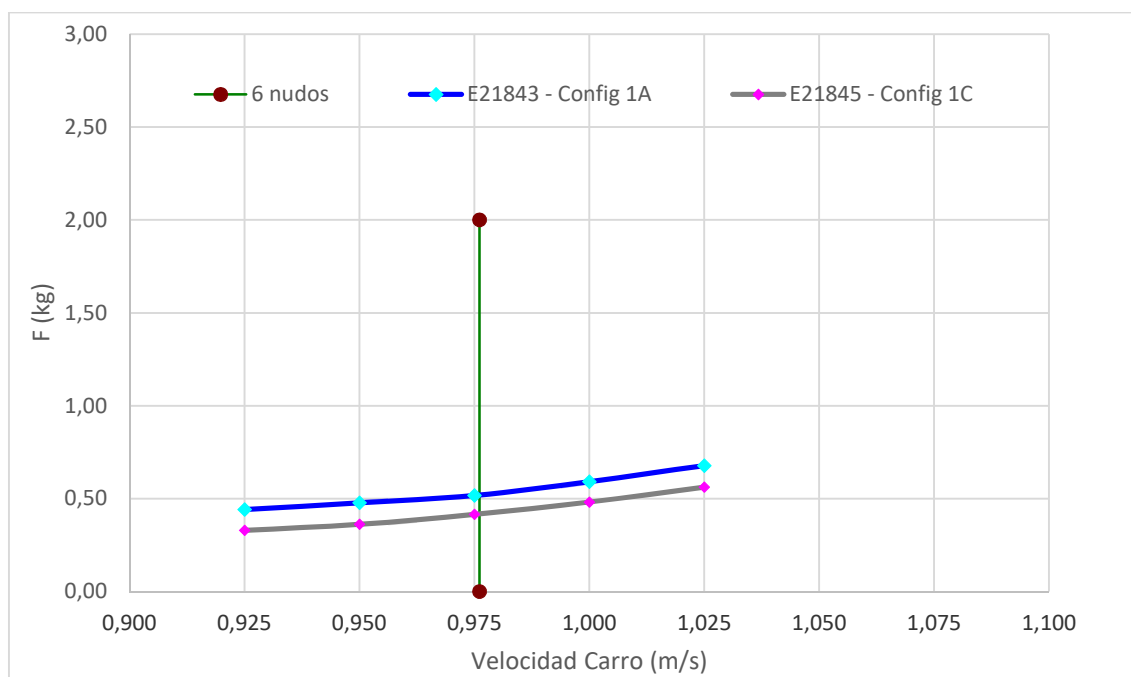


Figura 10. Resistencia del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en m/s.

E-21843. Calado 30%D, 150.0 mm. E-21845. Calado 25%D, 125.0 mm.

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

En la gráfica puede observarse el menor valor de la resistencia medida, cuando el calado es menor, curva gris.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941,9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor 941,9/500, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)		0,925	0,950	0,975	1,000	1,025
Resistencia	E21843	0,8311	0,8980	0,9742	1,1138	1,2774
(kg)	E21845	0,6208	0,6806	0,7821	0,9075	1,0575

Tabla 4. Resistencia del cilindro de proa, corregido para una anchura de 941.9 mm.

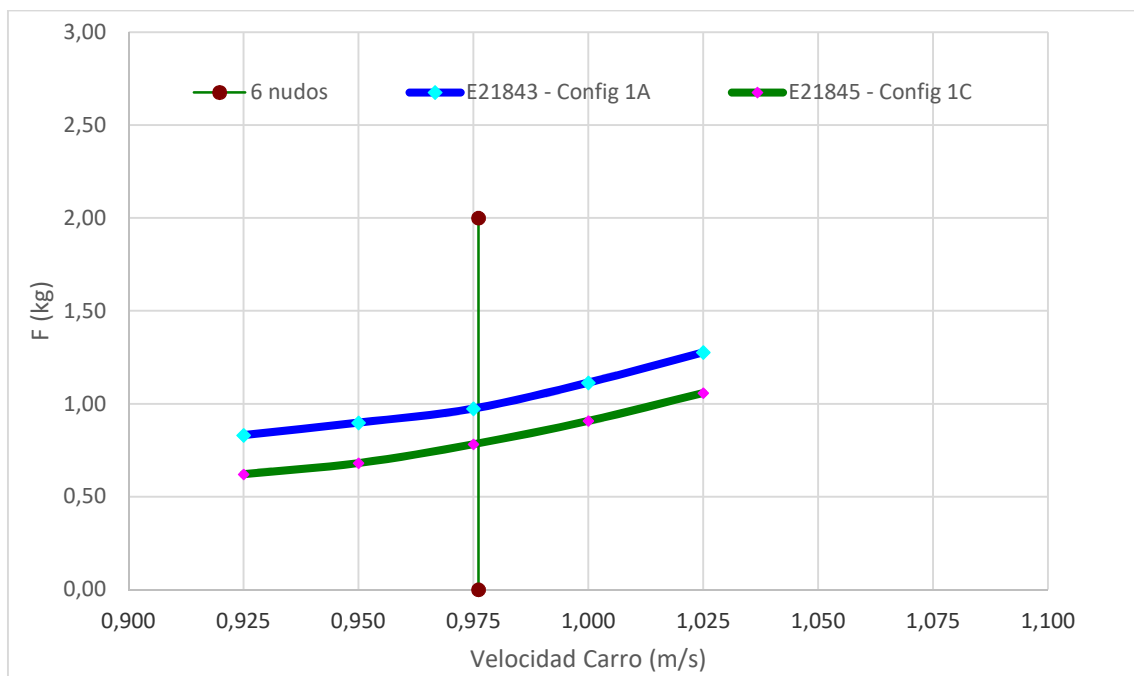


Figura 11. Estimación de la resistencia del rodillo de proa, para una achura de 941.9 mm.

E-21843. Calado 30%D, 150.0 mm. E-21845. Calado 25%D, 125.0 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa de ambos cilindros, cuya extensión aumentaba, al incrementar la velocidad del carro.

5.1.3. COMPARACIONES.

Cilindro 2948-Pr

Calado: 150.0 mm

Situación I. Trincado. Ensayo E 21843.

Situación I. Girando. Ensayo E 21844.

Velocidad carro (m/s)		0,925	0,950	0,975	1,000	1,025
Resistencia (kg)	E21843	0,8311	0,8980	0,9742	1,1138	1,2774

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Resistencia (kg)	E21844	0,3366	0,5527	0,9293	2,0015	3,6885

Tabla 5. Comparación de la resistencia del rodillo. Girando(E-21843) Trincado(E-21844). Calado 150 mm.

Los ensayos fueron realizados a diferentes velocidades de avance del carro.

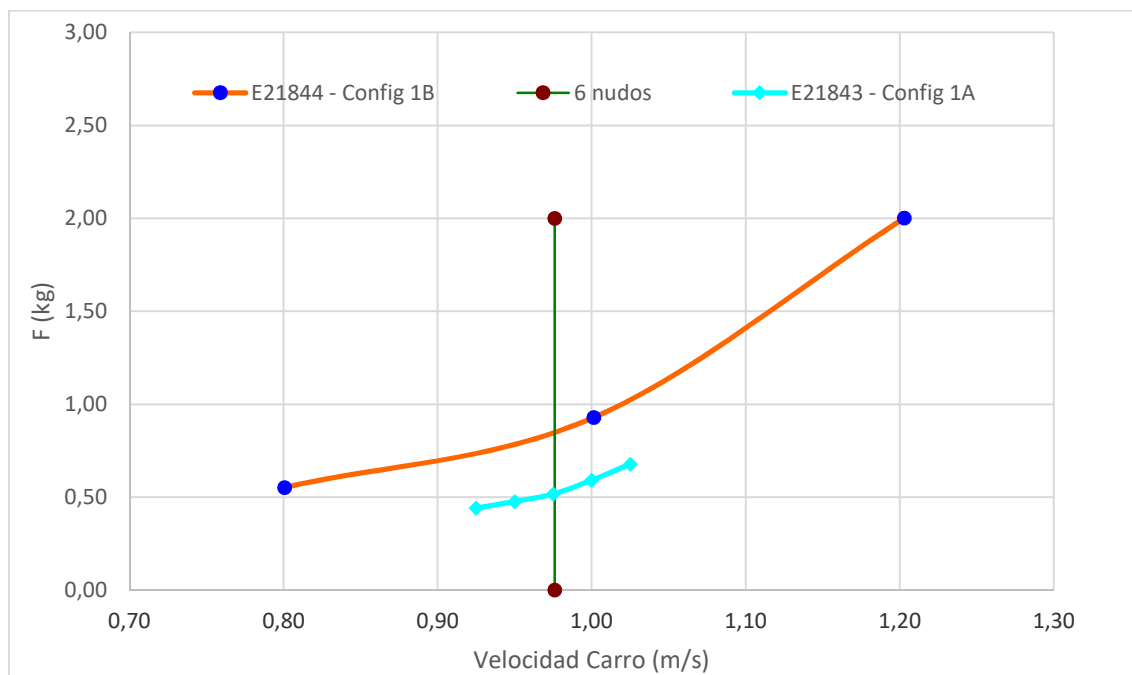


Figura 12. Resistencia a escala modelo. Calado 30%D, 150mm.

E-21843. Trincado. Calado 30%D, 150.0 mm. E-21844. Girando. Calado 30%D, 150.0 mm.

En la gráfica de las resistencias, presentadas en la figura 12, puede apreciarse la diferencia existente al comparar la situación de llevar el cilindro trincado, curva de color naranja, y girando a la velocidad sincronizada, curva de color azul, alcanzando la máxima diferencia, cercana al 36%, en las cercanías de 6 nudos.

Cilindro 2948-Pr

Calado: 125.0 mm

Situación I. Trincado. Ensayo E 21846.

Situación I. Girando. Ensayo E 21845.

Velocidad carro (m/s)		0,925	0,950	0,975	1,000	1,025
Resistencia (kg)	E21845	0,6208	0,6806	0,7821	0,9075	1,0575

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Resistencia (kg)	E21846	0,2352	0,4068	0,7692	1,6629	2,9949

Tabla 6. Comparación de la resistencia del rodillo. Girando(E-21845) Trincado(E-21846). Calado 125 mm.

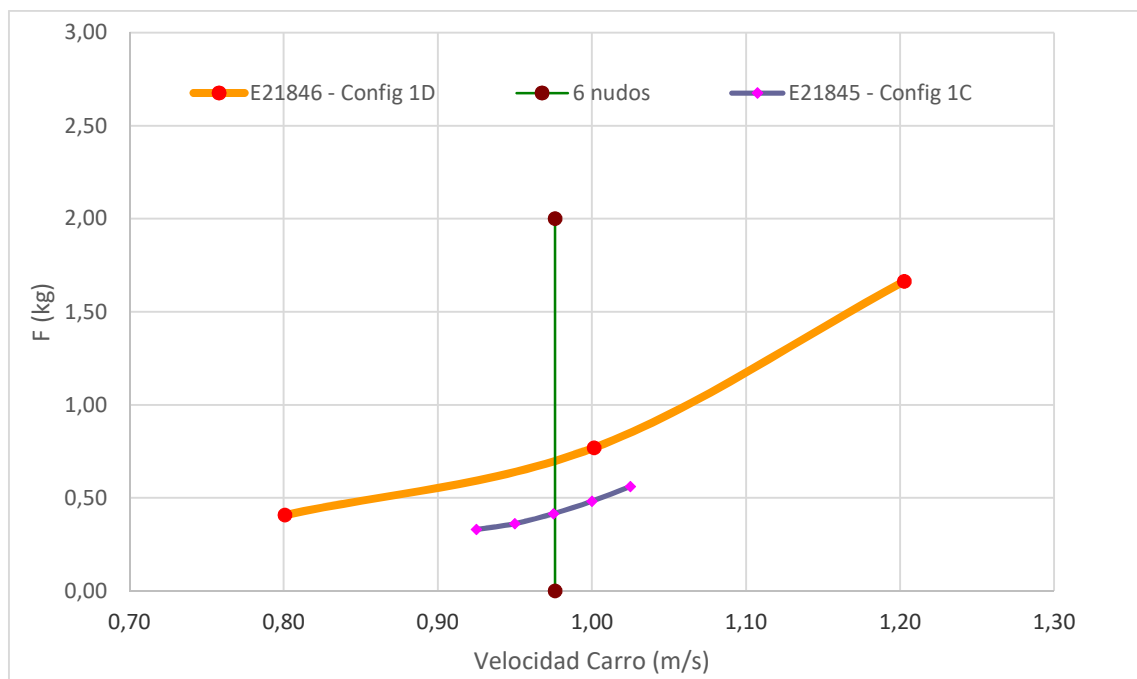


Figura 13. Resistencia a escala modelo. Calado 25%D, 125mm.

E-21846. Trincado. Calado 25%D, 125.0 mm. E-21845. Girando. Calado 25%D, 125.0 mm.

En la gráfica de las resistencias, presentadas en la figura 13, puede apreciarse la diferencia existente al comparar la situación de llevar el cilindro trincado, curva de color naranja, y girando a la velocidad sincronizada, curva de color gris.

En la gráfica de la figura 13 puede apreciarse que la resistencia medida. Cuando el rodillo gira a la velocidad sincronizada es menor que la resistencia total, cuando gira trincado, alcanzando la máxima diferencia, cercana al 36%, en las cercanías de 6 nudos.

5.2. LOS DOS RODILLOS CON EL MISMO CALADO

5.2.1. SEPARACION 15%D, 575 mm.

CONDICIONES DEL ENSAYO E-21842

Cilindros 2948-Pr y 2948-Pp

Calado: 150.0 mm

Separación entre ejes: 575.0 mm

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, es decir, 0,80 m/s; 1,0 m/s; 1,20 m/s y 1,40 m/s, para abarcar las velocidades solicitadas por el cliente, las correspondientes a 4.00 nudos (0.6507 m/s); 6.00 nudos (0.9761 m/s) y 8.00 nudos (1.3015 m/s). Nudos para escala real, modelo (m/s).

La velocidad de giro del cilindro de proa, 2948-Pr, fue establecida de acuerdo con la condición de la “velocidad rotacional sincronizada”, mientras que el cilindro de popa, 2948-Pp, permaneció sin girar durante todo el ensayo.

$$V = \omega R$$

Siendo, V, velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente, R, radio del cilindro, (m), ω , la velocidad de giro del cilindro, (rad/s).

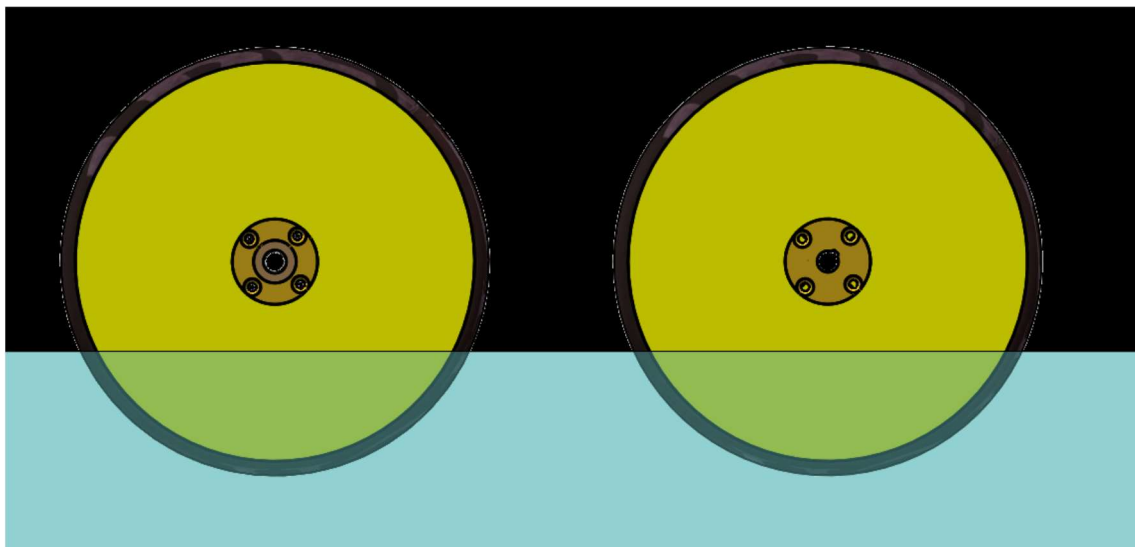


Figura 14. Velocidad rotacional sincronizada.

El sentido de giro del rodillo queda determinado con la condición de “rodar sin deslizar”, es decir, el vector de la velocidad del punto más bajo del cilindro ha de ser igual y de sentido opuesto al vector velocidad del carro.

Ello implica que la aceleración angular del rodillo es nula.

• **RESULTADOS DEL ENSAYO E-21842**

De acuerdo con el enunciado del segundo principio de Arcusín, se situaron los ejes de los cilindros en la estructura con una separación de 575 mm entre ejes, dejando un 15% del diámetro como separación entre las superficies periféricas más próximas de ambos rodillos.

El motivo de esta distancia está justificado, como segundo ensayo, para analizar la disminución de empuje que recibe el rodillo de proa, al aumentar la separación.

Durante la realización del ensayo se midieron, para cada velocidad, el empuje, la velocidad del carro y la velocidad de giro del rodillo de proa.

Para medir el empuje se colocó una célula de carga en el cilindro de proa, que permitía registrar la fuerza que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 7, acompañado de una gráfica, figura 15, con la representación de los valores del empuje (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,1622	0,2579	0,5065	0,2070	-0,3855

Tabla 7. Empuje del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

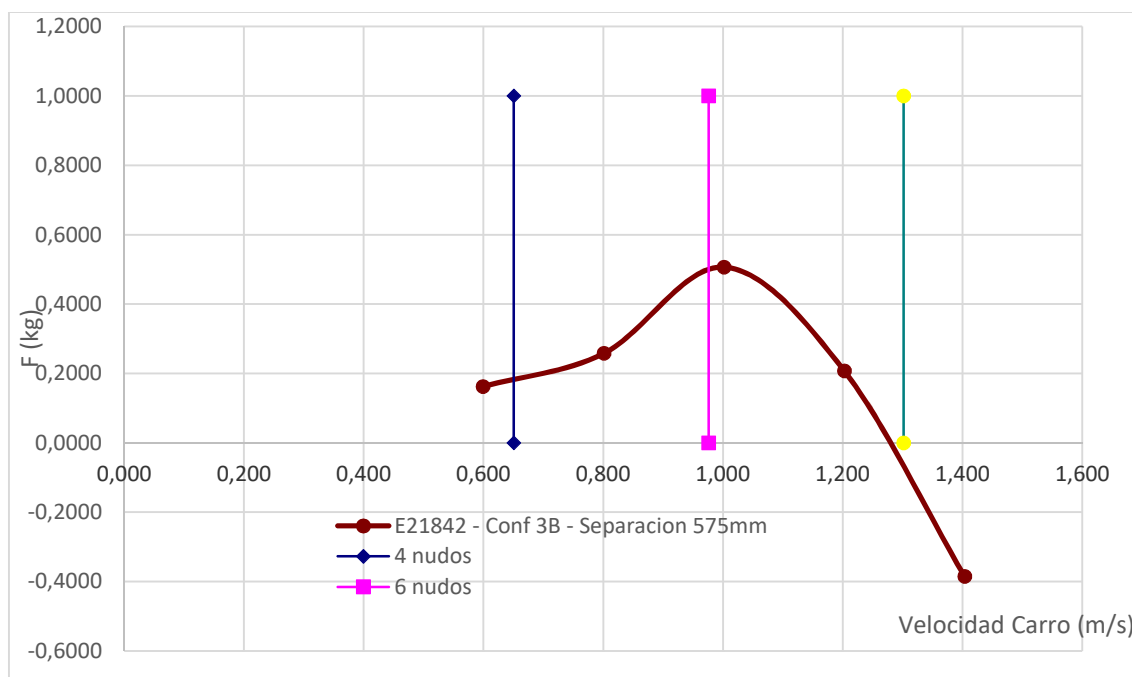


Figura 15. Empuje del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en nudos

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941,9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor 941,9/500, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,3056	0,4850	0,9541	0,3900	-0,7261

Tabla 8. Empuje del cilindro de proa, corregido para una anchura de 941.9 mm.

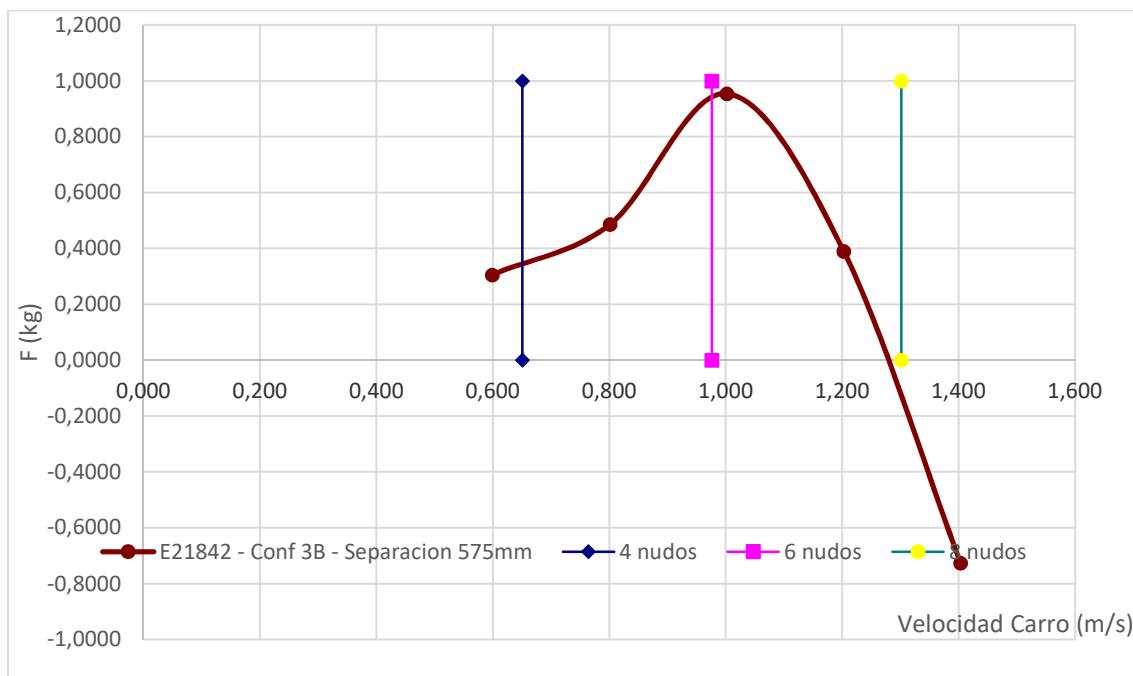


Figura 16. Estimación del empuje del rodillo de proa, para una achura de 941.9 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa de ambos cilindros, cuya longitud aumentaba, al incrementar la velocidad del carro, así como era mayor al calado de 30%D.

5.2.2. SEPARACION 25%D, 625 mm.

CONDICIONES DEL ENSAYO E-21841

Cilindros 2948-Pr y 2948-Pp

Calado: 150.0 mm

Separación entre ejes: 625.0 mm

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, es decir, 0,80 m/s; 1,0 m/s; 1,20 m/s y 1,40 m/s, para abarcar las velocidades solicitadas por el cliente, las correspondientes a 4.00 nudos (0.6507 m/s); 6.00 nudos (0.9761 m/s) y 8.00 nudos (1.3015 m/s). Nudos para escala real, modelo (m/s).

La velocidad de giro de ambos cilindros fue establecida de acuerdo con la condición de la “velocidad rotacional sincronizada”.

$$V = \omega R$$

Siendo, V , velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente, R , radio del cilindro, (m), ω , la velocidad de giro del cilindro, (rad/s).

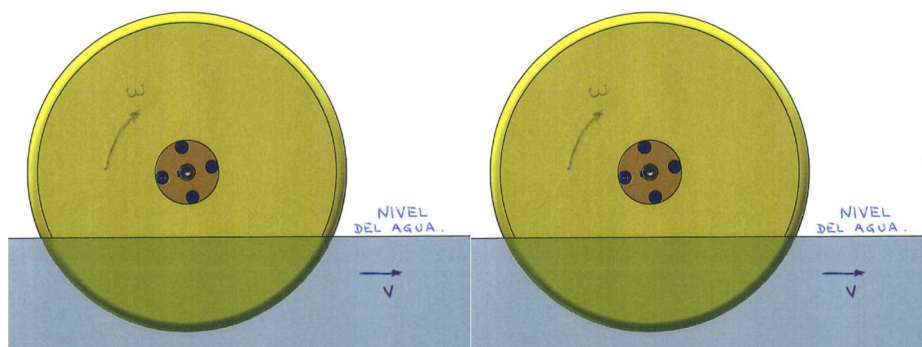


Figura 17. Velocidad rotacional sincronizada.

El sentido de giro de los rodillos queda determinado con la condición de “rodar sin deslizar”, es decir, el vector de la velocidad del punto más bajo del cilindro ha de ser igual y de sentido opuesto al vector velocidad del carro.

Ello implica que la aceleración angular de ambos rodillos es nula.

• **RESULTADOS DEL ENSAYO E-21841**

De acuerdo con el enunciado del segundo principio de Arcusín, se situaron los ejes de los cilindros en la estructura con una separación de 625 mm entre ejes, dejando un 25% del diámetro como separación entre las superficies periféricas más próximas de ambos rodillos.

El motivo de esta distancia está justificado, como tercer ensayo, para analizar la disminución de empuje que recibe el rodillo de proa, al aumentar la separación.

Durante la realización del ensayo se midieron, para cada velocidad, el empuje, la velocidad del carro y la velocidad de giro del rodillo de proa.

Para medir el empuje se colocó una célula de carga en el cilindro de proa, que permitía registrar la fuerza que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 9, acompañado de una gráfica, figura 18, con la representación de los valores del empuje (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,0426	0,0732	0,1994	-0,3182	-1,1155

Tabla 9. Empuje del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

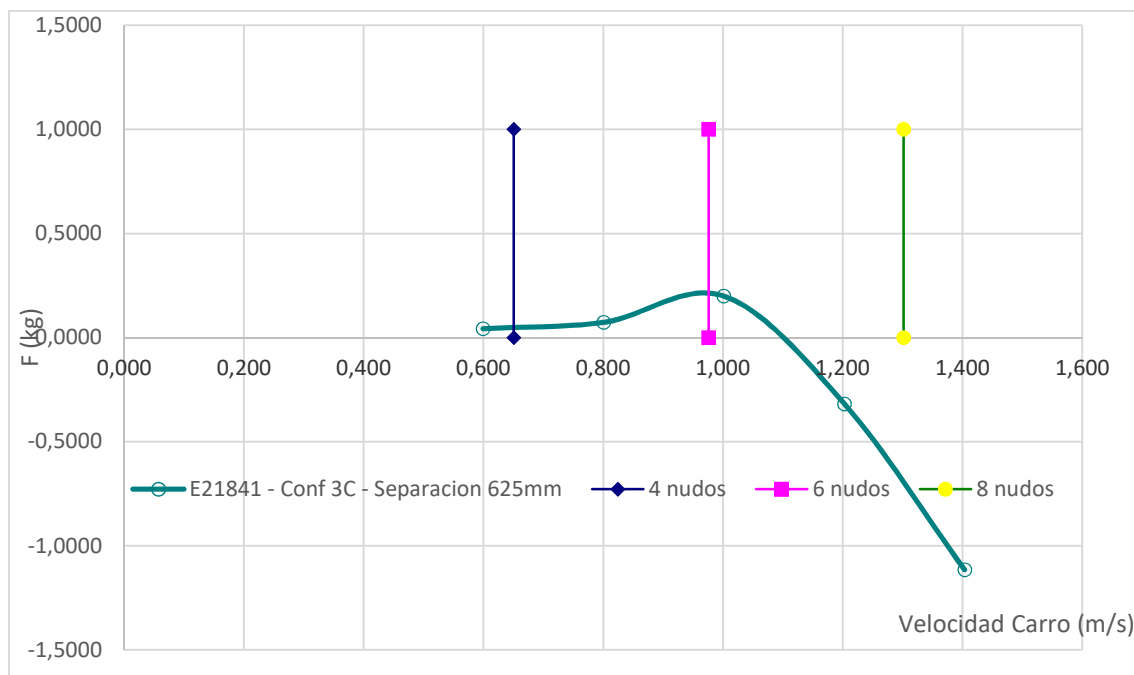


Figura 18. Empuje del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en nudos

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941,9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor 941,9/500, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,0802	0,1379	0,3756	-0,5994	-2,1013

Tabla 10. Empuje del cilindro de proa, corregido para una anchura de 941.9 mm.

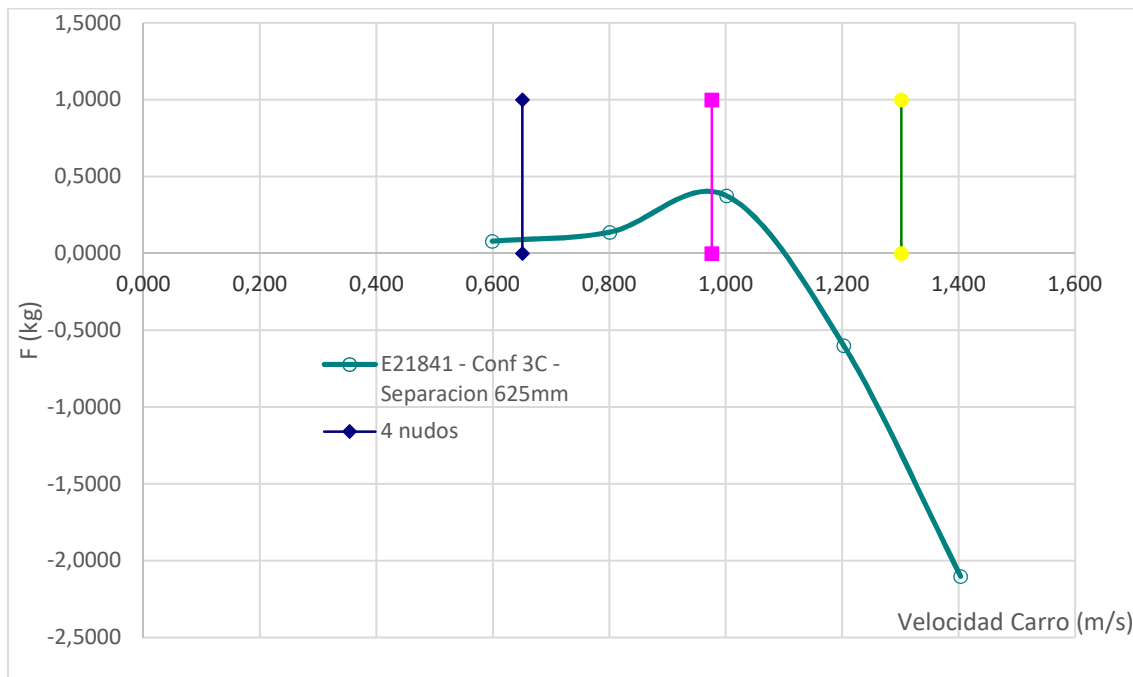


Figura 19. Estimación del empuje del rodillo de proa, para una achura de 941.9 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa de ambos cilindros, cuya longitud aumentaba, al incrementar la velocidad del carro, así como era mayor al calado de 30%D.

5.2.3. COMPARACIONES.

Cilindro 2948-Pr

Calado: Ambos cilindros con calado 150.0 mm

Situación II. Cilindro de popa Trincado. Ensayo E 21833. Entre ejes, 525 mm

Situación II. Cilindro de popa Trincado. Ensayo E 21842. Entre ejes, 575 mm

Situación II. Cilindro de popa Trincado. Ensayo E 21841. Entre ejes, 625 mm

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje	E21833		0,4005	0,5857	0,4663	0,0890
(kg)	E21833	0,1622	0,2479	0,5065	0,2070	-0,3855
	E21841	0,0426	0,0732	0,1994	-0,3182	-1,1155

Tabla 11. Calado 150 mm. Empuje a diferentes separaciones de los cilindros.

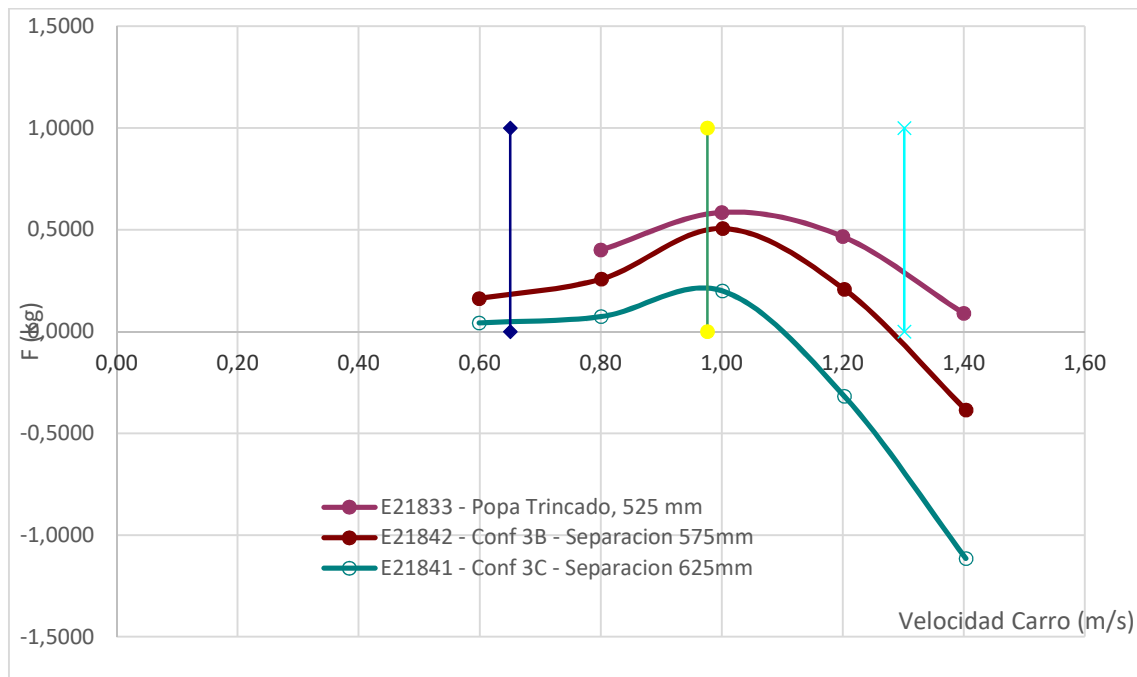


Figura 20. Empuje del rodillo de proa, para diferentes separaciones. Calado 150 mm.

5.3. LOS DOS RODILLOS CON DIFERENTES CALADOS

Para generalizar el segundo principio de Arcusín, se ha considerado una alternativa, concerniente al calado de los cilindros, analizando la posibilidad de que el cilindro de proa tenga menor calado que el rodillo de popa.

5.3.1. SEPARACION 15%D, 575 mm.

CONDICIONES DEL ENSAYO E-21839

Cilindros 2948-Pr y 2948-Pp

Calado: Popa, 30%D, 150.0 mm. Proa, 25%D, 125.0 mm.

Separación entre ejes: 575.0 mm

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, es decir, 0,80 m/s; 1,0 m/s; 1,20 m/s y 1,40 m/s, para abarcar las velocidades solicitadas por el cliente, las correspondientes a 4.00 nudos (0.6507 m/s); 6.00 nudos (0.9761 m/s) y 8.00 nudos (1.3015 m/s). Nudos para escala real, modelo (m/s).

La velocidad de giro del cilindro de proa fue establecida de acuerdo con la condición de la “velocidad rotacional sincronizada”. El cilindro de popa permaneció trincado durante todo el ensayo.

$$V = \omega R$$

Siendo, V, velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente, R, radio del cilindro, (m), ω , la velocidad de giro del cilindro, (rad/s).

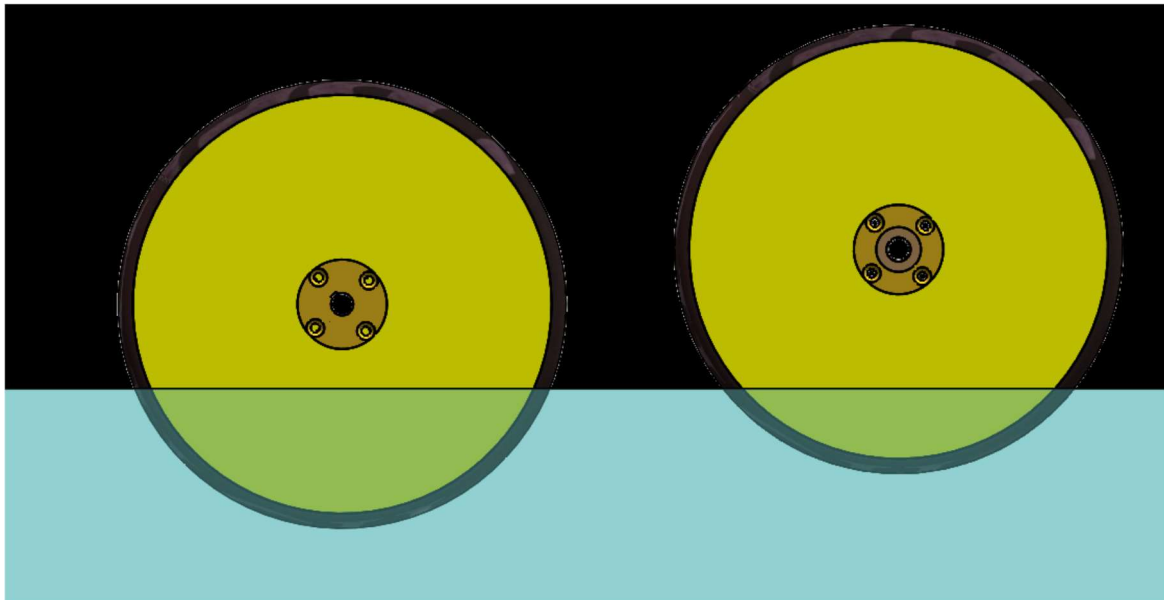


Figura 21. Velocidad rotacional sincronizada.

El sentido de giro del rodillo de proa queda determinado con la condición de “rodar sin deslizar”, es decir, el vector de la velocidad del punto más bajo del cilindro ha de ser igual y de sentido opuesto al vector velocidad del carro.

Ello implica que la aceleración angular de este rodillo es nula.

• **RESULTADOS DEL ENSAYO E-21839**

De acuerdo con el enunciado del segundo principio de Arcusín, se situaron los ejes de los cilindros en la estructura con una separación de 575 mm entre ejes, dejando un 15% del diámetro como separación entre las superficies periféricas más próximas de ambos rodillos.

El motivo de esta distancia está justificado, como segundo ensayo, para analizar la disminución de empuje que recibe el rodillo de proa, al aumentar la separación.

Durante la realización del ensayo se midieron, para cada velocidad, el empuje, la velocidad del carro y la velocidad de giro del rodillo de proa.

Para medir el empuje se colocó una célula de carga en el cilindro de proa, que permitía registrar la fuerza que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 12, acompañado de una gráfica, figura 22, con la representación de los valores del empuje (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,1811	0,3271	0,5499	0,3302	-0,0271

Tabla 12. Empuje del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

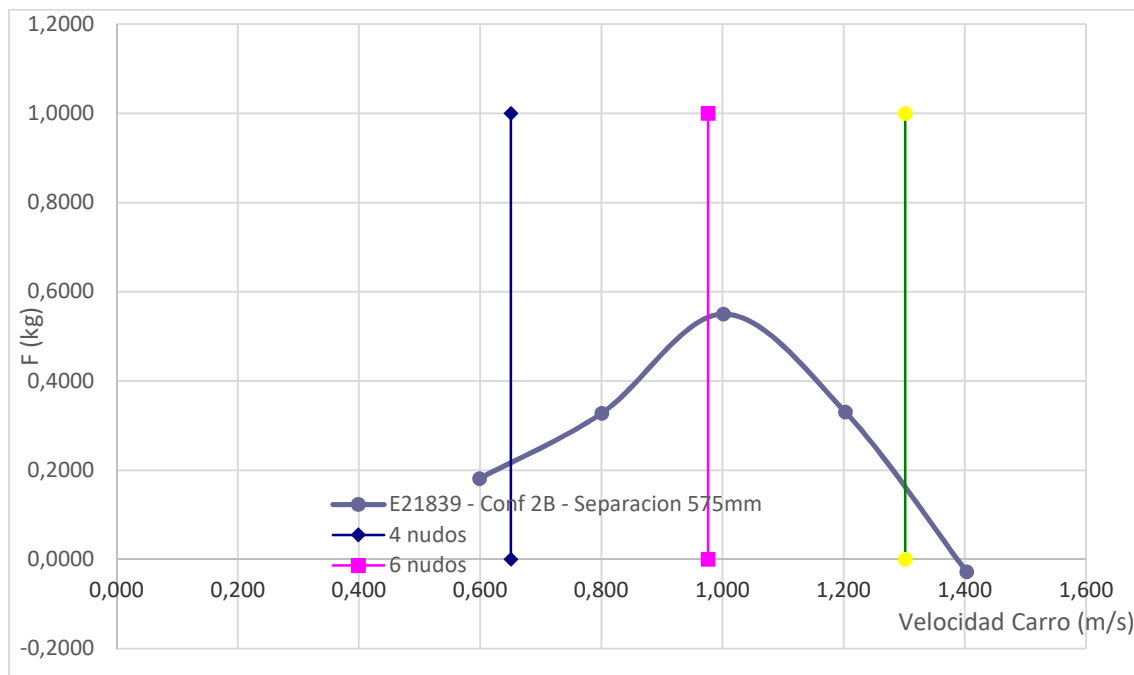


Figura 22. Empuje del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en nudos

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941.9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor $941,9/500$, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,3412	0,6173	1,0360	0,6220	-0,0522

Tabla 13. Empuje del cilindro de proa, corregido para una anchura de 941.9 mm.

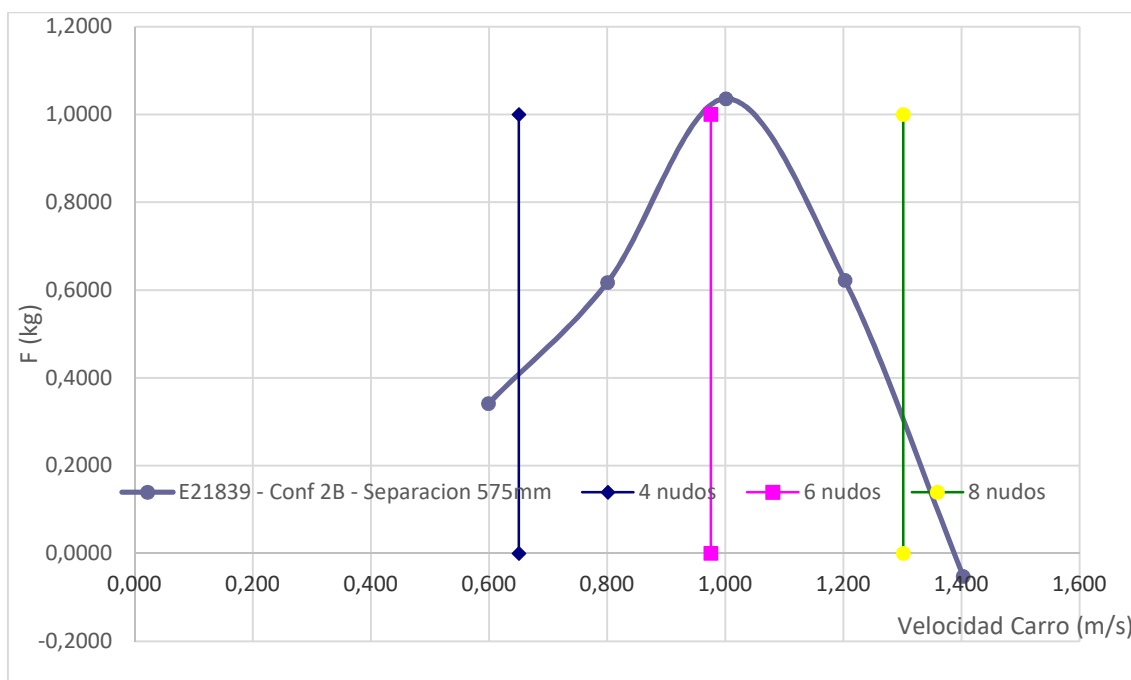


Figura 23. Estimación del empuje del rodillo de proa, para una anchura de 941.9 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa de ambos cilindros, cuya longitud aumentaba, al incrementar la velocidad del carro, así como era mayor al calado de 30%D.

5.3.2. SEPARACION 25%D, 625 mm.

CONDICIONES DEL ENSAYO E-21840

Cilindros 2948-Pr y 2948-Pp

Calado: Popa, 30%D, 150.0 mm. Proa, 25%D, 125.0 mm.

Separación entre ejes: 625.0 mm

El ensayo fue realizado a diferentes velocidades de avance del carro, partiendo de 0,60 m/s e incrementando la velocidad del carro cada 0,20 m/s, es decir, 0,80 m/s; 1,0 m/s; 1,20 m/s y 1,40 m/s, para abarcar las velocidades solicitadas por el cliente, las correspondientes a 4.00 nudos (0.6507 m/s); 6.00 nudos (0.9761 m/s) y 8.00 nudos (1.3015 m/s). Nudos para escala real, modelo (m/s).

La velocidad de giro del cilindro de proa fue establecida de acuerdo con la condición de la “velocidad rotacional sincronizada”.

$$V = \omega R$$

Siendo, V, velocidad del carro, (m/s), equivalente a la velocidad de la corriente, R, radio del cilindro, (m), ω , la velocidad de giro del cilindro, (rad/s).

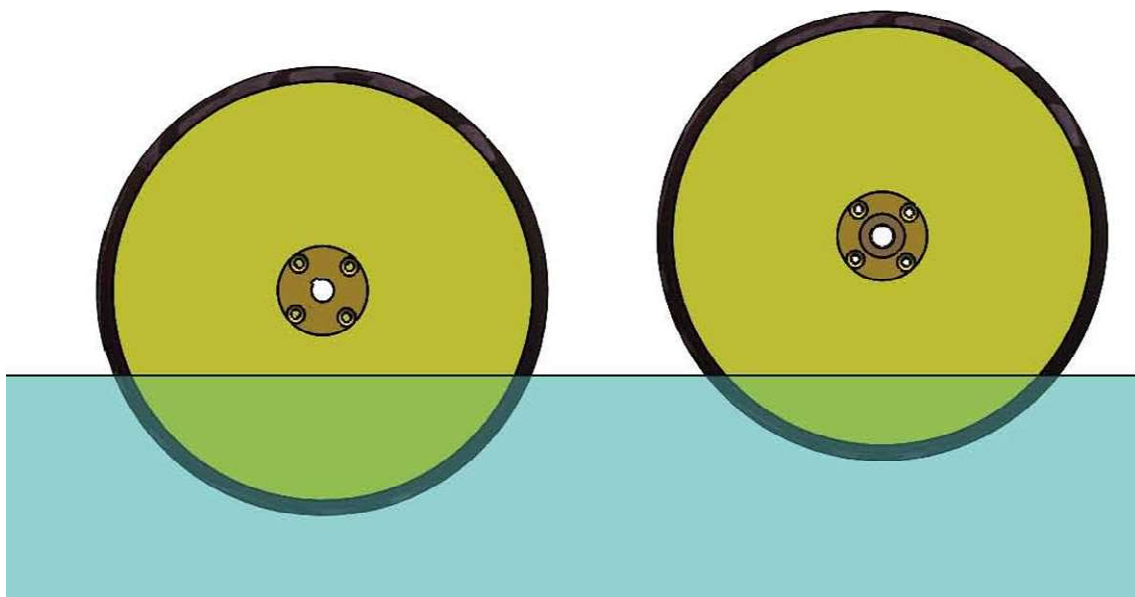


Figura 24. Velocidad rotacional sincronizada.

El sentido de giro del rodillo de proa queda determinado con la condición de “rodar sin deslizar”, es decir, el vector de la velocidad del punto más bajo del cilindro ha de ser igual y de sentido opuesto al vector velocidad del carro.

Ello implica que la aceleración angular de ambos rodillos es nula.

• **RESULTADOS DEL ENSAYO E-21840**

De acuerdo con el enunciado del segundo principio de Arcusín, se situaron los ejes de los cilindros en la estructura con una separación de 625 mm entre ejes, dejando un 25% del diámetro como separación entre las superficies periféricas más próximas de ambos rodillos.

El motivo de esta distancia está justificado, como tercer ensayo, para analizar la disminución de empuje que recibe el rodillo de proa, al aumentar la separación.

Durante la realización del ensayo se midieron, para cada velocidad, el empuje, la velocidad del carro y la velocidad de giro del rodillo de proa.

Para medir el empuje se colocó una célula de carga en el cilindro de proa, que permitía registrar la fuerza que actuaba.

Una tabla, con los valores numéricos de los resultados obtenidos, se presenta en la tabla 14, acompañado de una gráfica, figura 25, con la representación de los valores del empuje (kg) en función de la velocidad del carro (m/s).

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,0995	0,1885	0,3401	-0,0442	-0,6566

Tabla 14. Empuje del cilindro de proa, medido durante el ensayo.

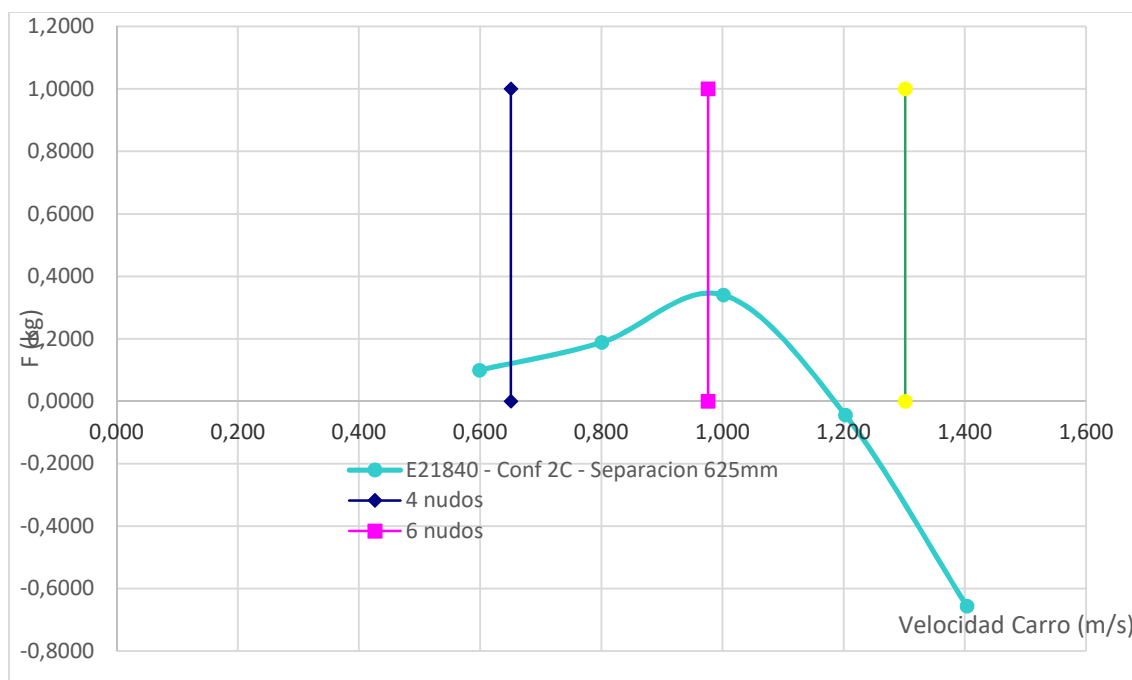


Figura 25. Empuje del rodillo de proa a cada velocidad, significando las velocidades en nudos

Las limitaciones de espacio en la estructura, instalada en el carro remolcador del Canal de Aguas Tranquilas, obligaron a reducir la anchura de los rodillos al valor de 500 mm.

El requisito del proyecto APHRES recomienda una anchura de 941,9 mm., teniendo en cuenta la escala $\lambda = 10,00$. En consecuencia, los resultados obtenidos deben ser multiplicados por el factor 941,9/500, para dar respuesta al tamaño de 9,419 m que, realmente, define el diseño de los cilindros a escala real.

Velocidad carro (m/s)	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	0,1875	0,3551	0,6406	-0,0833	-1,2369

Tabla 15. Empuje del cilindro de proa, corregido para una anchura de 941.9 mm.

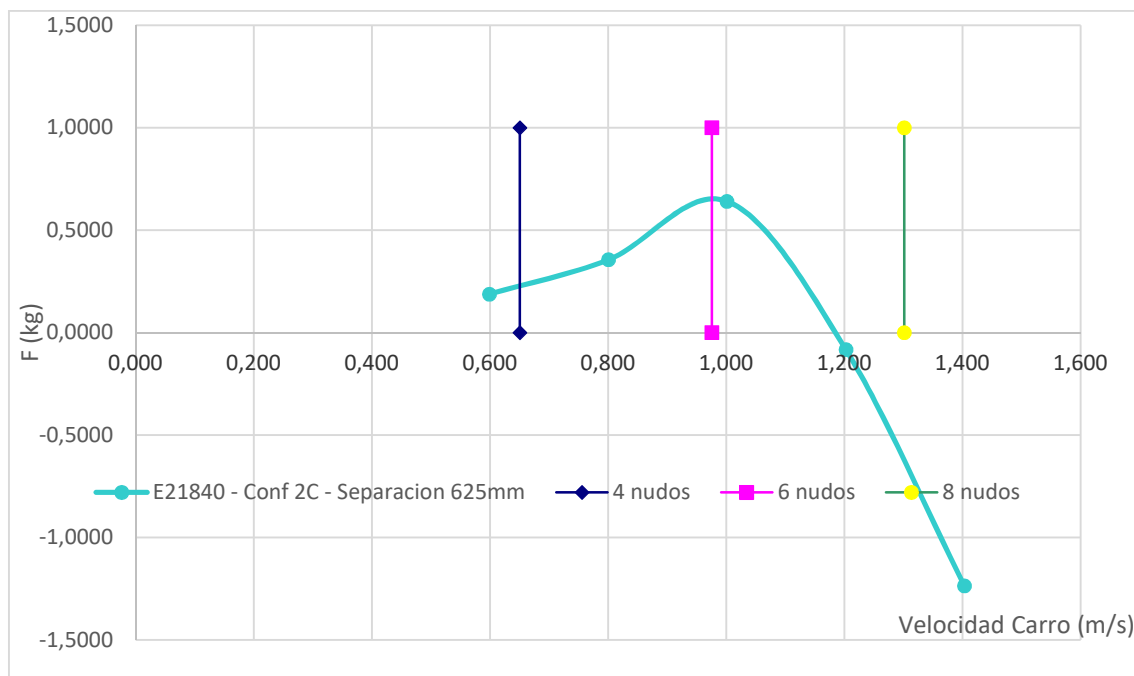


Figura 26. Estimación del empuje del rodillo de proa, para una achura de 941.9 mm.

Durante la realización del ensayo pudo observarse la generación de un tren de olas a proa de ambos cilindros, cuya longitud aumentaba, al incrementar la velocidad del carro, así como era mayor al calado de 30%D.

5.3.3. COMPARACIONES.

Cilindros 2948-Pr y 2948-Pp

Calado: Popa, 30%D, 150.0 mm. Proa, 25%D, 125.0 mm.

Separación entre ejes: 525.0 mm, 575.0 mm y 625.0 mm

Los ensayos fueron realizados a diferentes velocidades de avance del carro.

Velocidad carro (m/s)		0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Empuje (kg)	E21838	0,2476	0,4389	0,7005	06064	0,3955
	E21839	0,1811	0,3277	0,5499	0,3302	-0,0277
	E21840	0,0955	0,3401	0,3401	-0,0442	-0,6566

Tabla 16. Calado de proa 125 mm. Empuje a diferentes separaciones de los cilindros.

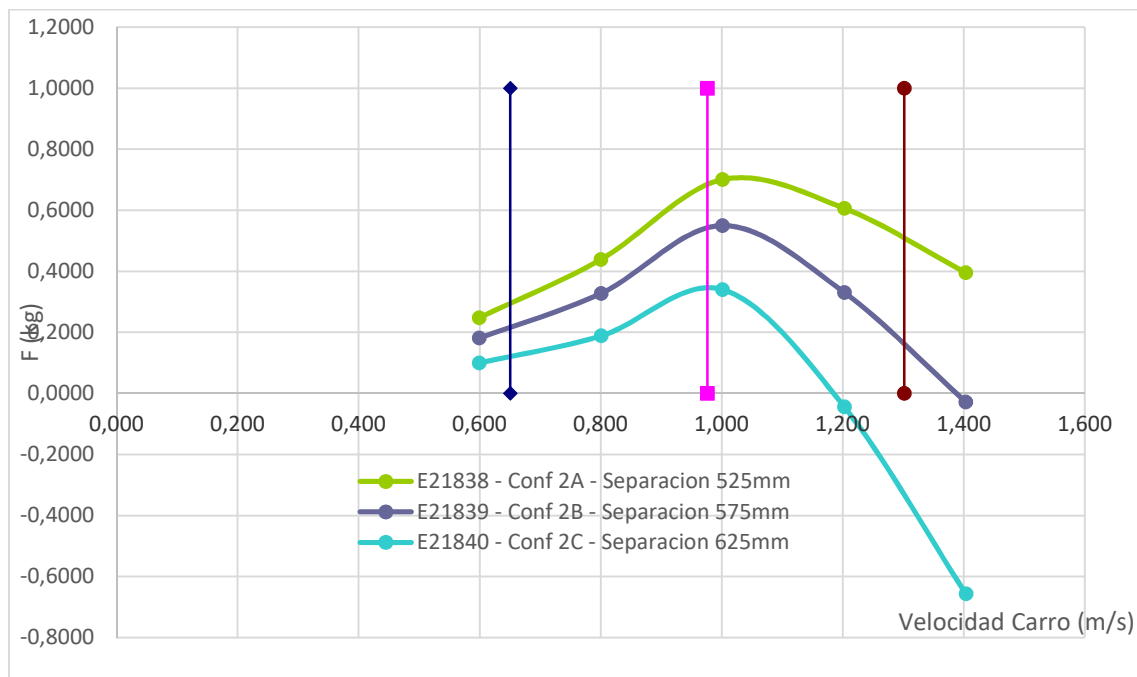


Figura 27. Estimación del empuje del rodillo de proa. Calado de proa 125 mm.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

La estructura, diseñada y fabricada en los talleres de la SGSN del INTA, ha permitido realizar los ensayos y se han medido, mediante una célula de carga, tanto la resistencia en la situación I, como el empuje recibido por el rodillo de proa en las situaciones II, ambos rodillos con el mismo calado y III, el rodillo de proa con el calado de 125 mm.

Como consecuencia de los resultados presentados en los diferentes epígrafes de este informe, se deduce que la velocidad óptima de trabajo de este sistema de generación de energía está cercana al valor de 1,0 m/s a escala modelo, que corresponde aproximadamente a 6 nudos a escala real, de acuerdo con el factor de escala = 10,0.

Adoptando los valores correspondientes a esta velocidad, se establece la primera línea de la tabla 17, cuando la separación entre los cilindros corresponde al calado de 30%D, es decir, 150 mm. En ambos cilindros.

Adoptando los valores correspondientes a esta velocidad, se establece la segunda línea de la tabla 17, cuando la separación entre los cilindros corresponde al calado de 30%D, es decir, 150 mm, para el cilindro de popa y 25%, 150 mm, para el rodillo de proa.

Separación (%)	5,00	15,00	25,00
Calado de ambos cilindros, 30%D, 150 mm	0,5857	0,5065	0,1994
Calado rodillo popa, 30%D, 150mm y calado rodillo proa, 25%D, 125mm	0,7005	0,5499	0,3401

Tabla 17. Empuje del cilindro de proa, a diferentes distancias entre rodillos, expresado en %D..

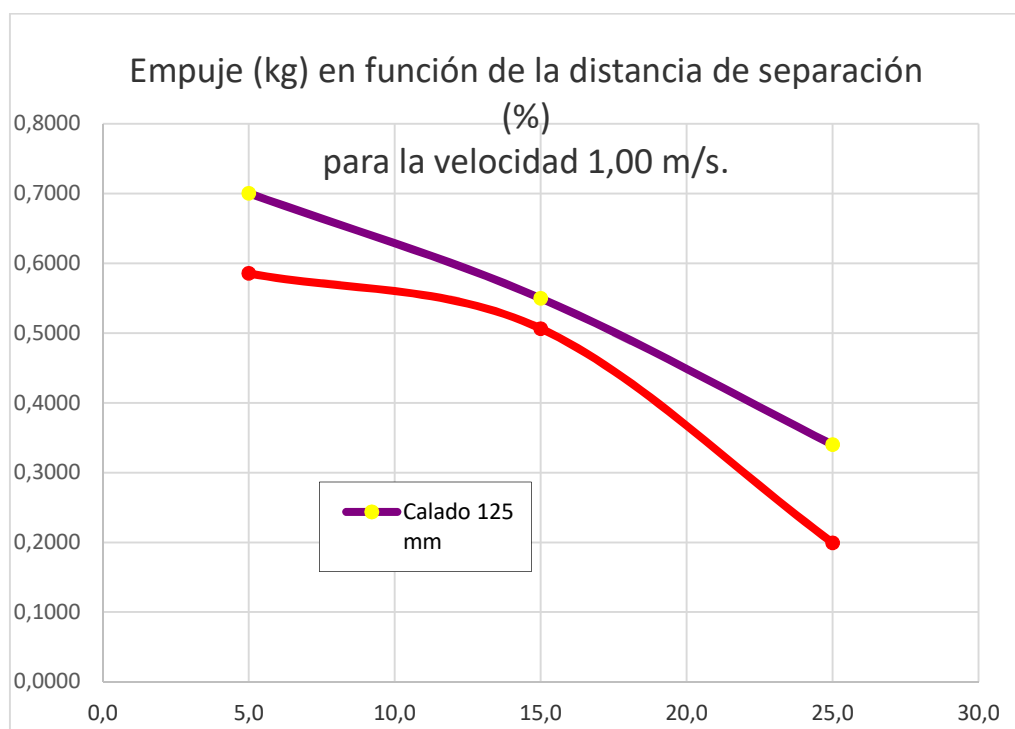


Figura 28. Estimación del empuje del rodillo de proa, en dos situaciones.

Calado de ambos rodillos 30%D, 150 mm. Curva de color rojo.

Calado de los rodillos: Proa 25%D, 125mm. Popa 30%D, 150mm. Curva de color morado.

Las curvas correspondientes a la gráfica de la figura 28, ponen de manifiesto la disminución del empuje que recibe el rodillo de proa, a medida que aumenta la separación entre ambos cilindros.

Este hecho, corrobora el primer principio de Arcuín.

Es evidente que la disminución del empuje con el aumento de la separación entre los rodillos ocurre en ambas curvas, es decir, con ambas situaciones ensayadas con diferentes calados, lo cual da generalidad a este principio.

Con los valores de la tabla 17 se ha elaborado la gráfica 28. Analizando la figura, y teniendo en cuenta los valores de las tabla 17, se establece que el empuje desaparece al 29,3%D de la separación entre cilindros, 146,3 mm, es decir, para una separación entre ejes de 646,3 mm, cuando llevan el mismo calado, 30%D.

Por el contrario, cuando el cilindro de proa lleva un calado inferior, 25%D, o sea, 125 mm, el empuje que recibe el rodillo de proa perdura hasta un 37,32%D de la separación entre rodillos, 186,6 mm, es decir, una separación de 686,6 mm entre los ejes de giro de ambos rodillos.

7. CONCLUSIONES

La estructura, diseñada y fabricada en los talleres de la SGSN del INTA, ha permitido realizar el ensayo y se ha medido, mediante una célula de carga, el empuje recibido por el cilindro de proa a diferentes velocidades y la resistencia, cuando un rodillo actuaba en solitario.

En este informe se presentan los resultados de dos tipos diferentes de ensayos. En primer lugar, se han realizado unas pruebas con un rodillo en solitario, que han permitido probar el primer principio de Arcusín. En segundo lugar, se han ensayado los dos cilindros, variando su separación, midiéndose el empuje que recibe el rodillo de proa, habiéndose verificado el segundo principio de Arcusín.

Los cilindros han girado a velocidades sincronizadas, siendo la velocidad del punto más bajo de la periferia igual a la velocidad del carro, con sentido opuesto, según se ha representado en la figura 9.

Los resultados obtenidos, cuando se ensaya un rodillo en solitario a diferentes calados, tanto trincado, como girando, demuestran que la resistencia medida es menor cuando el rodillo está girando a la velocidad sincronizada.

La disminución de la resistencia, cuando el rodillo gira a la velocidad sincronizada llega a alcanzar minoraciones cercanas al 36% a velocidades próximas a 1 m/s a escala de modelo, que se aproxima a 6.0 nudos a escala real, de acuerdo con la escala del modelo, $\lambda=10.0$.

En consecuencia, en base a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con un solo rodillo, se establece el cumplimiento del primer principio de Arcusín.

En relación con el funcionamiento de los dos rodillos, manteniendo siempre el rodillo de popa trincado, se han obtenido resultados que ponen de manifiesto la existencia de un empuje que recibe el cilindro de proa, cuyo valor disminuye a medida que aumenta la separación entre rodillos. Esto hecho ocurre, también, a diferentes calados.

A partir de los resultados obtenidos con menor inmersión en el rodillo de proa, se deduce que es mayor el empuje recibido en esta situación, con respecto a los valores registrados con los dos cilindros trabajando con el mismo calado, como puede observarse en la figura 28.

En consecuencia, en base a los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con dos cilindros, se confirma el cumplimiento del segundo principio de Arcusín.

El Pardo, 30 de noviembre de 2021

**RAMON
QUEREDA**
Firmado digitalmente por
RAMON QUEREDA
Fecha: 2021.12.01
14:10:30 +01'00'

Ramón Quereda Laviña

Doctor Ingeniero Naval, jefe de buque

**PEREZ VILLALONGA
FRANCISCO JAVIER**
Firmado digitalmente por
PEREZ VILLALONGA
FRANCISCO JAVIER |
41496111V
Fecha: 2021.12.01 14:38:49
+01'00'

CN (CIA) Francisco J. Pérez Villalonga

Subdirector Gral. de Sistemas Navales.