

D3 – h – 2 – HYBRID SYSTEM FUEL OIL CONSUMPTION EFFICIENCY

En este documento se analizan los requerimientos expuestos en el punto **2.5 HYBRID SYSTEM FUEL OIL CONSUMPTION EFFICIENCY** del Anexo 3 de Licitación. Con esto, se estudia el consumo de combustible del sistema híbrido de baterías del buque en los siguientes casos:

MODO HÍBRIDO 0 - Sólo potencia de baterías, en puerto.

MODO HÍBRIDO 1 - Sólo potencia de baterías, en navegación y sosteniendo una velocidad continua de tres (3) nudos.

MODO HÍBRIDO 2 - Sólo potencia de baterías, en navegación y sosteniendo una velocidad continua máxima de seis (6) nudos $\pm 5\%$

MODO HÍBRIDO 2.1 - Potencia de baterías y un (1) grupo auxiliar, en navegación y sosteniendo una velocidad continua máxima de seis (6) nudos $\pm 5\%$

MODO HÍBRIDO 2.2 - Potencia de baterías y dos (2) grupos auxiliares, en navegación y sosteniendo una velocidad continua máxima de seis (6) nudos $\pm 5\%$

A continuación, se procede al cálculo caso a caso:

- En los modos 0, 1 y 2 el consumo de combustible es igual a cero (0), puesto que en estas condiciones el sistema híbrido del buque se alimenta totalmente de las baterías.
- Para el modo 2.1, se ha procedido al estudio de tres condiciones:
 - o **CASO A:** Propulsión con un grupo generador hasta máxima velocidad y posteriormente alimentación con las baterías. Se prioriza la vida de la batería y por lo tanto un menor uso de ella. Para ello se podría navegar con el grupo generador (propulsión diesel-eléctrica) hasta una velocidad de 5 nudos y a partir de esta velocidad y hasta el máximo de 7,55 nudos se haría ya necesario el uso de los bancos de baterías. Como el motor ya estaría al 100% MCR no tendría remanente para la carga de baterías y por lo tanto la autonomía a esa velocidad dependerá del exceso de velocidad por encima de 5 nudos. A esta velocidad máxima híbrida de 7,55 nudos confluyen ambos casos pudiendo mantenerla 30 minutos.
 - o **CASO B:** Emisiones cero con baterías, hasta los 6,7 nudos y posteriormente con un grupo generador hasta la velocidad máxima en modo híbrido. Se prioriza las emisiones a la atmósfera y por lo tanto un mayor uso de las baterías. Para ello se ha calculado cual es la velocidad máxima sólo con aportación de baterías teniendo en cuenta el SoH requerido y se llega a la conclusión que es de 6.6 nudos. Si posteriormente se quisiese llegar a la máxima velocidad del modo híbrido de 7,55 nudos haría falta el concurso del auxiliar que iría aportando potencia hasta llegar a esta velocidad. Es en este escenario entre 5 y 7,55 nudos en el que grupo podría

pasarse a la máxima potencia y el remanente podría ser usado bien para recargar baterías o bien para propulsar el barco pasando al caso B que es en términos de eficiencia energética mejor que la carga y la propulsión simultánea.

- **CASO C:** Consiste en optimizar el consumo específico del grupo generador y llevarlo a su mínimo, en torno al 80%-85% de su MCR usando el exceso de potencia en cargar las baterías (aun perdiendo eficiencia). Esto sólo funcionaría hasta velocidades por debajo de 3 nudos, puesto que a partir de esa velocidad es mejor desde el punto de la eficiencia energética el uso del grupo como propulsor diesel-eléctrico.

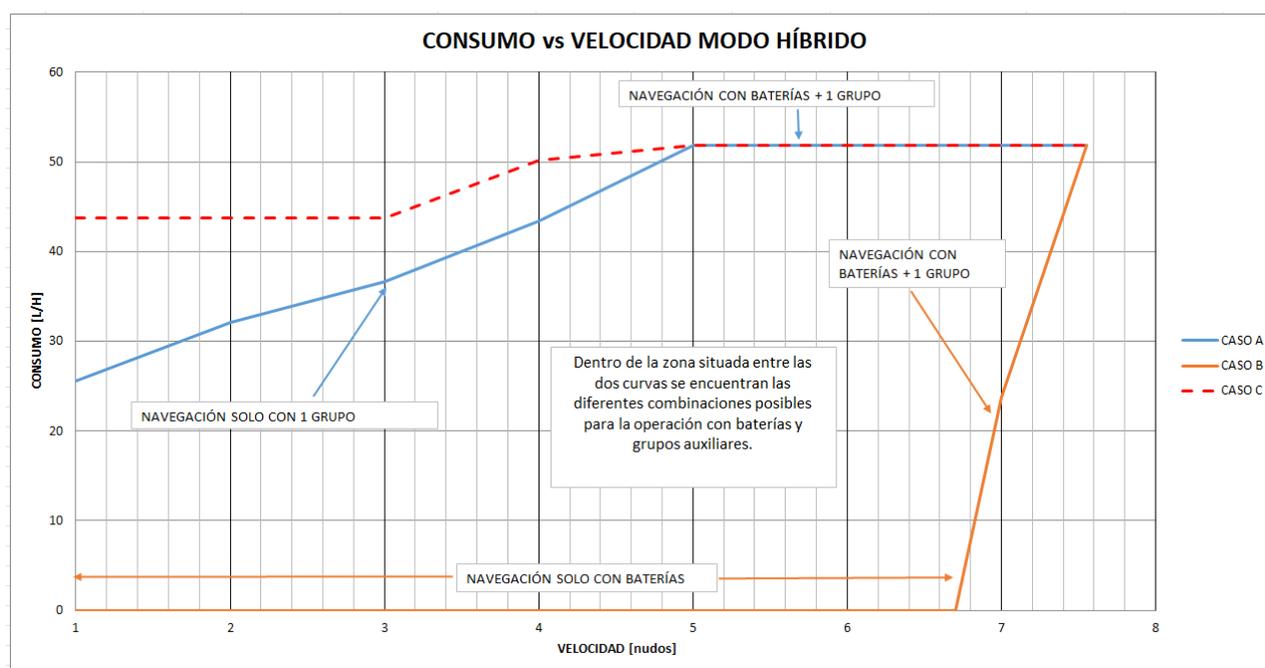
Con esto se obtienen los siguientes resultados:

MODO HÍBRIDO 2.1

Velocidad [nudos]	Carga total (Propulsión + Hotel) [kW]	CASO A						CASO B					
		Grupo auxiliar [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	Baterías [kW]	[g/kWh]	[l/h]	Grupo auxiliar [kW]	Baterías [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	[g/kWh]	[l/h]
1	83	83	93,8%	88,8	0	255	25,5	0	83	93,8%	0	0	0,0
2	108	108	93,8%	115,0	0	248	32,2	0	108	93,8%	0	0	0,0
3	132,8	133	93,8%	141,5	0	230	36,7	0	133	93,8%	0	0	0,0
4	169	169	93,8%	180,1	0	214	43,4	0	169	93,8%	0	0	0,0
5	270	200	93,8%	213,2	70	215	51,8	0	270	93,8%	0	0	0,0
6	416	200	93,8%	213,2	216	215	51,8	0	416	93,8%	0	0	0,0
6,7	542	200	93,8%	213,2	342	215	51,8	0	542	93,8%	0	0	0,0
7	619	200	93,8%	213,2	419	215	51,8	77	542	93,8%	82	256	23,7
7,55	742	200	93,8%	213,2	542	215	51,8	200	542	93,8%	213	215	51,8

CASO C					
Grupo auxiliar [kW]	Baterías [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	[g/kWh]	[l/h]
170	CARGANDO	93,8%	181,2	214	43,7
170	CARGANDO	93,8%	181,2	214	43,7
170	CARGANDO	93,8%	181,2	214	43,7
194	CARGANDO	93,8%	206,8	215	50,2
200	70	93,8%	213,2	215	51,8
200	216	93,8%	213,2	215	51,8
200	342	93,8%	213,2	215	51,8
200	419	93,8%	213,2	215	51,8
200	542	93,8%	213,2	215	51,8

SHIP SPEED (knots)	1	2	3	4	5	6	6,7	7	7,55
Propulsion Load (kW)	24	46	68	100	190	320	433	501	611
Hydraulic Steering Pump Load per Shaft (kW)	8,3	9,8	11,7	13,9	16,4	19,2	21,1	22,4	24,0
Losses (kW) per Shaft (such as, but not limited, to MCD)	0,0	0,2	0,3	0,7	1,6	3,2	4,1	5,0	5,9
Total Propulsion Load (kW)	24	46	69	101	193	326	441	511	623
Efficiency Auxiliary Engine Charging Battery Pack (%)	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938
Efficiency Battery Pack Providing Power for Propulsion (%)	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927
Total Propulsion Power (kW)	26	50	74	109	208	352	476	551	672
Net Electrical Hotel Load (kW) - Underway (Hybrid)	54	55	56	57	59	61	63	64	66
Efficiency Battery Pack Providing Power for Electrical Hotel Load (%)	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951
Gross Electrical Hotel Load (kW)	57	58	59	60	62	64	66	68	69
Total Load (kW) - (Propulsion + Electrical)	83	108	132	169	270	416	542	619	742



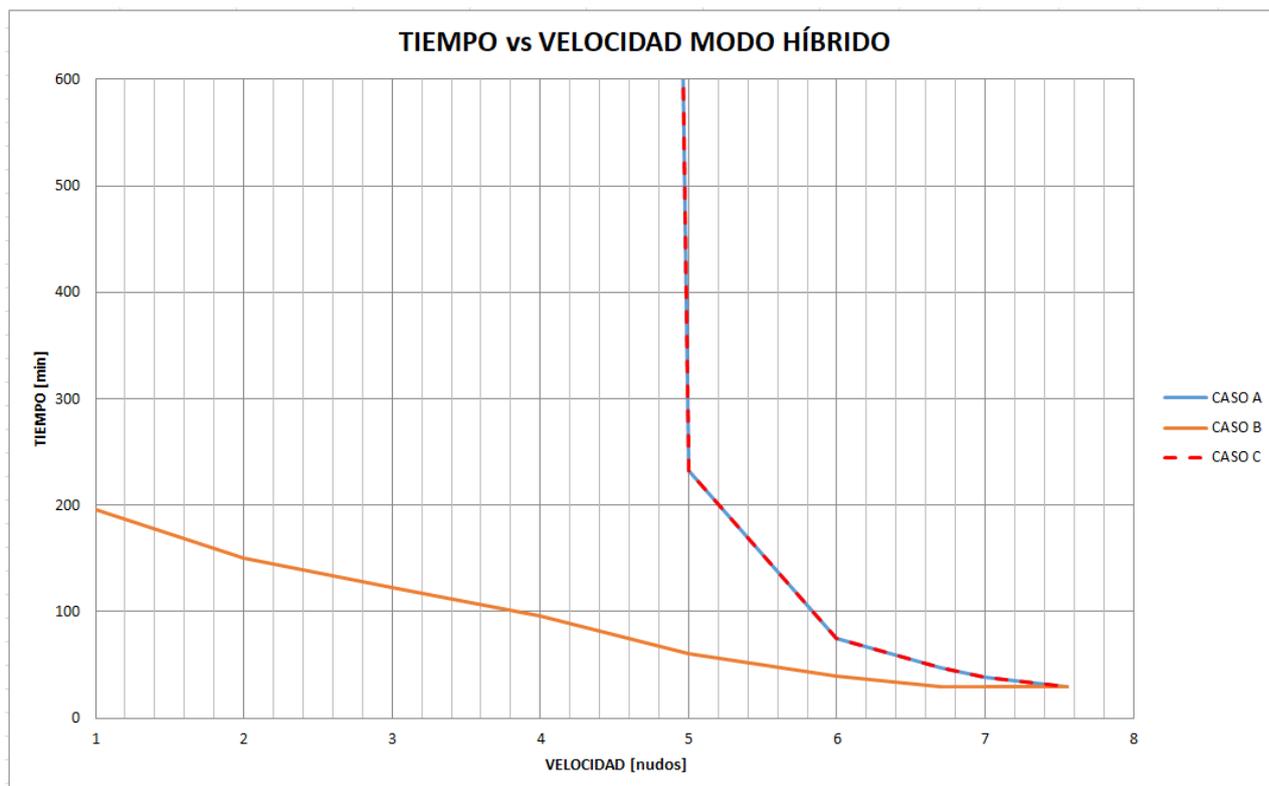
Como se puede observar en la gráfica, dentro de la zona comprendida entre las dos curvas se encontrarían las distintas combinaciones posibles para la operación con baterías y los grupos auxiliares. En la tabla superior se pueden observar los consumos en litros/hora correspondientes a cada velocidad.

El sistema de gestión de la energía, EMS, y el sistema de gestión baterías, BMS, monitorizarán el estado de las baterías y de sus protecciones de seguridad, gestionarán el control de la energía, así como el porcentaje de carga de los motores, la velocidad y el SoC de las baterías, con ello se optimizará durante la vida operativa de las baterías su estado, SOH, y la durabilidad.

Se ha de tener en cuenta que en el modo de emisiones cero (navegación solo con baterías) la máxima velocidad híbrida será igual a **6,7 nudos**, y esta podrá ser mantenida durante **treinta (30) minutos**.

Una vez analizado, además, se comprueba que la velocidad máxima alcanzable será de **7,55 nudos** para una navegación máxima de treinta (30) minutos en baterías y con un grupo generador.

Adicionalmente se han calculado los tiempos de duración de estas navegaciones, a continuación, se presentan las gráficas representando los mismos:



V Velocidad [nudos]	Tiempo [min]		
	CASO A	CASO B	CASO C
1.00	**	195	**
2.00	**	151	**
3.00	**	122	**
4.00	**	96	**
5.00	232	60	232
6.00	75	39	75
6.70	48	30	48
7.00	39	30	39
7.55	30	30	30

** Tiempo limitado a la capacidad de gasoil del buque.

MODO HÍBRIDO 2.2

Para el modo 2.2, se ha procedido al estudio de nuevo de tres condiciones:

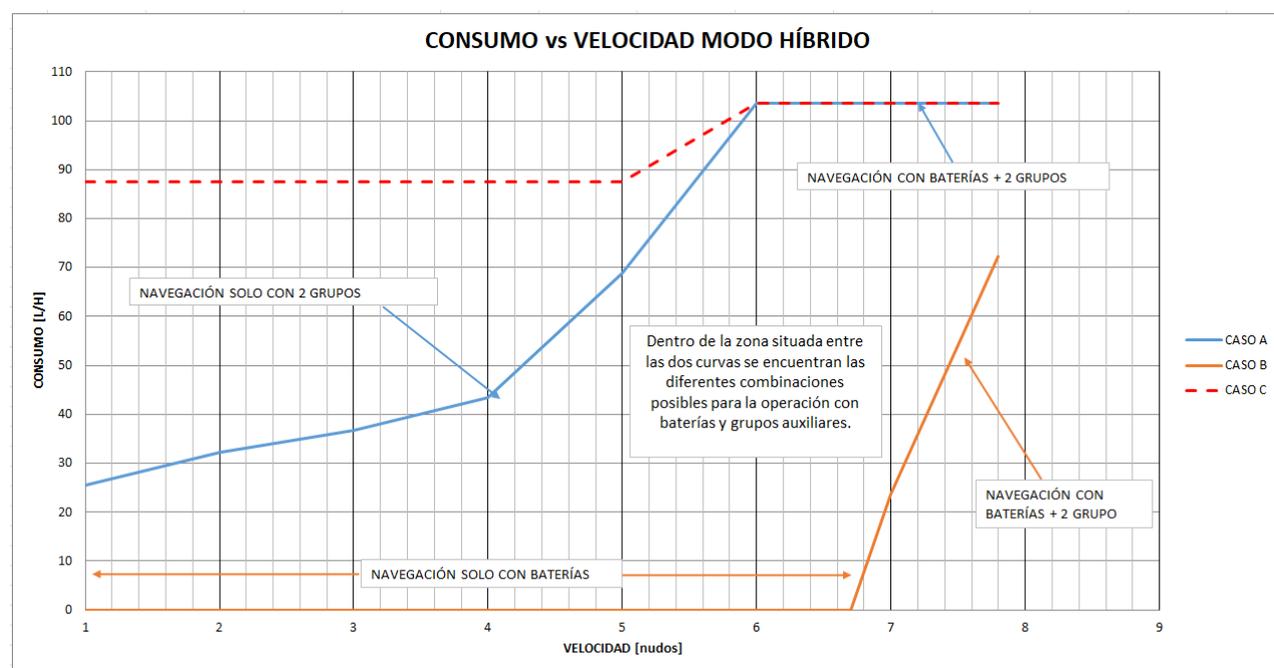
- Caso A: Propulsión con los dos grupos generadores hasta máxima velocidad y posteriormente alimentación con las baterías.
- Caso B: Emisiones cero con baterías, hasta los 6,6 nudos y posteriormente con los dos grupos generadores hasta la velocidad máxima en modo híbrido.
- Caso C: Propulsión con los dos grupos generadores hasta máxima velocidad y posteriormente alimentación con las baterías. Los grupos operarán en torno al 80%-85% de su MCR

Con esto se obtienen los siguientes resultados:

Velocidad [nudos]	Carga total (Propulsión + Hotel) [kW]	CASO A						CASO B					
		Grupo auxiliar [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	Baterías [kW]	[g/kWh]	[l/h]	Grupo auxiliar [kW]	Baterías [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	[g/kWh]	[l/h]
1	83	83	93,8%	89	0	255	25,5	0	83	93,8%	0	0	0,0
2	108	108	93,8%	115	0	248	32,2	0	108	93,8%	0	0	0,0
3	133	133	93,8%	142	0	230	36,7	0	133	93,8%	0	0	0,0
4	169	169	93,8%	180	0	214	43,4	0	169	93,8%	0	0	0,0
5	270	270	93,8%	288	0	212	68,8	0	270	93,8%	0	0	0,0
6	416	400	93,8%	426	16	215	103,6	0	416	93,8%	0	0	0,0
6,7	542	400	93,8%	426	142	215	103,6	0	542	93,8%	0	0	0,0
7	619	400	93,8%	426	219	215	103,6	77	542	93,8%	82	256	23,7
7,8	825	400	93,8%	426	425	215	103,6	283	542	93,8%	302	212	72,2

CASO C					
Grupo auxiliar [kW]	Baterías [kW]	Eficiencia alternador - grupo	Potencia motor auxiliar [kW]	[g/kWh]	[l/h]
340	CARGANDO	93,8%	362,5	214	87,4
340	CARGANDO	93,8%	362,5	214	87,4
340	CARGANDO	93,8%	362,5	214	87,4
340	CARGANDO	93,8%	362,5	214	87,4
340	CARGANDO	93,8%	362,5	214	87,4
400	16	93,8%	426,4	215	103,6
400	142	93,8%	426,4	215	103,6
400	219	93,8%	426,4	215	103,6
400	425	93,8%	426,4	215	103,6

SHIP SPEED (knots)	1	2	3	4	5	6	6,7	7	7,8
Propulsion Load (kW)	24	46	68	100	190	320	433	501	685
Hydraulic Steering Pump Load per Shaft (kW)	8,3	9,8	11,7	13,9	16,4	19,2	21,1	22,4	26,0
Losses (kW) per Shaft (such as, but not limited, to MCD)	0,0	0,2	0,3	0,7	1,6	3,2	4,1	5,0	7,5
Total Propulsion Load (kW)	24	46	69	101	193	326	441	511	700
Efficiency Auxiliary Engine Charging Battery Pack (%)	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938
Efficiency Battery Pack Providing Power for Propulsion (%)	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927
Total Propulsion Power (kW)	26	50	74	109	208	352	476	551	755
Net Electrical Hotel Load (kW) - Underway (Hybrid)	54	55	56	57	59	61	63	64	66
Efficiency Battery Pack Providing Power for Electrical Hotel Load (%)	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951	0,951
Gross Electrical Hotel Load (kW)	57	58	59	60	62	64	66	68	69
Total Load (kW) - (Propulsion + Electrical)	83	108	132	169	270	416	542	619	825

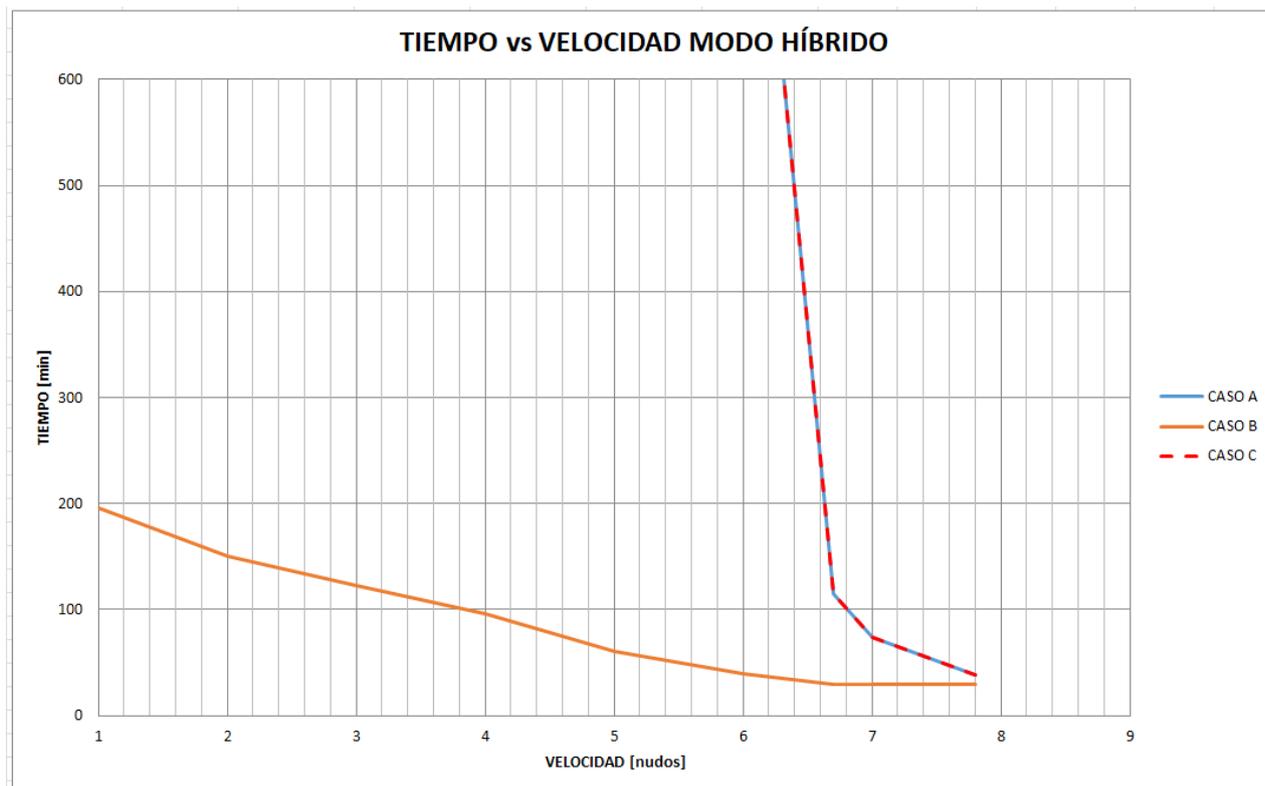


Como se puede observar en la gráfica, dentro de la zona comprendida entre las dos curvas se encontrarían las distintas combinaciones posibles para la operación con baterías y los grupos auxiliares. En la tabla superior se pueden observar los consumos en litros/hora correspondientes a cada velocidad.

Se ha de tener en cuenta que en el modo de emisiones cero (navegación solo con baterías) la máxima velocidad híbrida será igual a **6,7 nudos**, y esta podrá ser mantenida durante **treinta (30) minutos**.

Una vez analizado, además, se comprueba que la velocidad máxima alcanzable será de **7,8 nudos** para una navegación máxima de treinta (30) minutos en baterías y con dos grupos generadores.

Adicionalmente se han calculado los tiempos de duración de estas navegaciones, a continuación, se presentan las gráficas representando los mismos:



V	Tiempo [min]		
Velocidad [nudos]	CASO A	CASO B	CASO C
1.00	**	195	**
2.00	**	151	**
3.00	**	122	**
4.00	**	96	**
5.00	**	60	**
6.00	995	39	995
6.70	115	30	115
7.00	74	30	74
8.10	30	30	30

*** Tiempo limitado a la capacidad de gasoil del buque.*

CONCLUSIONES

- En los modos 0, 1 y 2, los consumos serán nulos hasta el agotamiento de las baterías.
- En el modo 2.1, se podrá tener un consumo cero en baterías hasta 6,7 nudos.
- En el modo 2.2, se podrá tener un consumo cero en baterías hasta 6,7 nudos y una velocidad máxima alcanzable de 7,8 nudos.