

The logo for Naturgy, featuring the word "Naturgy" in white sans-serif font on a dark blue background, with an orange stylized leaf icon to the right.

Antonio Miranda,  
Head of Bunkering  
[amiranda@naturgy.com](mailto:amiranda@naturgy.com)



**Hydrógeno y amoniaco, dos combustibles alternativos en el  
transporte marítimo.  
Proyecto **NEWBunker****

## Objetivo la descarbonización

# Electrificación $\neq$ decarbonización

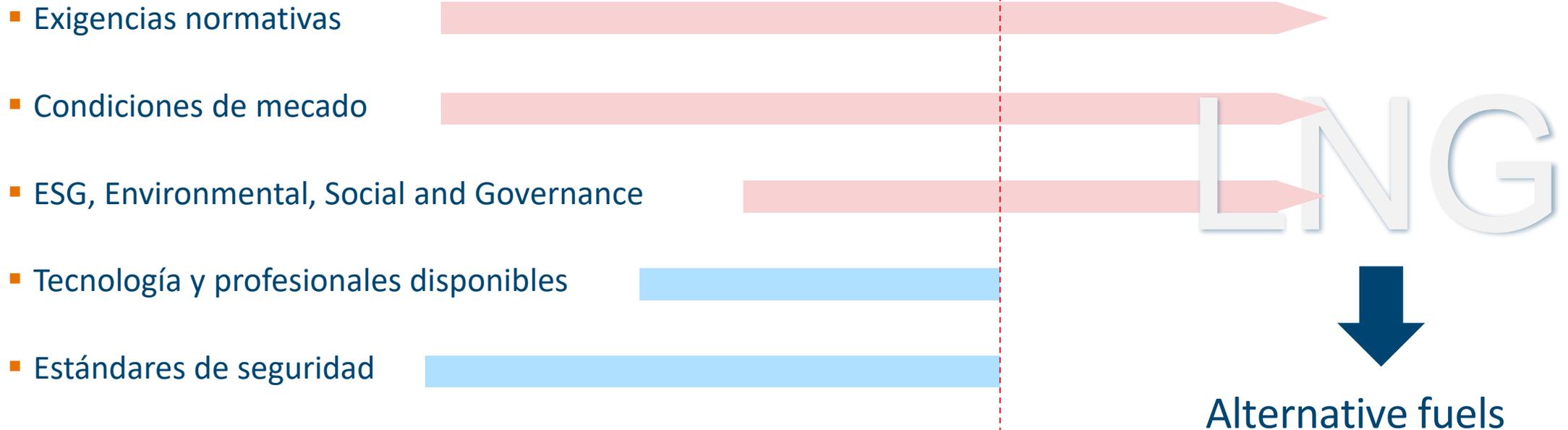
- Industrias intensivas en el uso de calor, vehículos pesados y el transporte marítimo **no utilizarán electricidad.**
- **La electrificación no será suficiente** para alcanzar por si sola los objetivos de descarbonización.
- **Electrification will not suffice** to meet the decarbonization challenges.
- Combustibles alternativos como GNL, NH<sub>3</sub>, biometano e hidrógeno están llamados a jugar un papel decisivo en la descarbonización del transporte marítimo.

## Principales barreras encontradas

- Exigencias normativas 
- Condiciones de mercado 
- ESG, Environmental, Social and Governance 
- Tecnología y profesionales disponibles 
- Estándares de seguridad 

# LNG

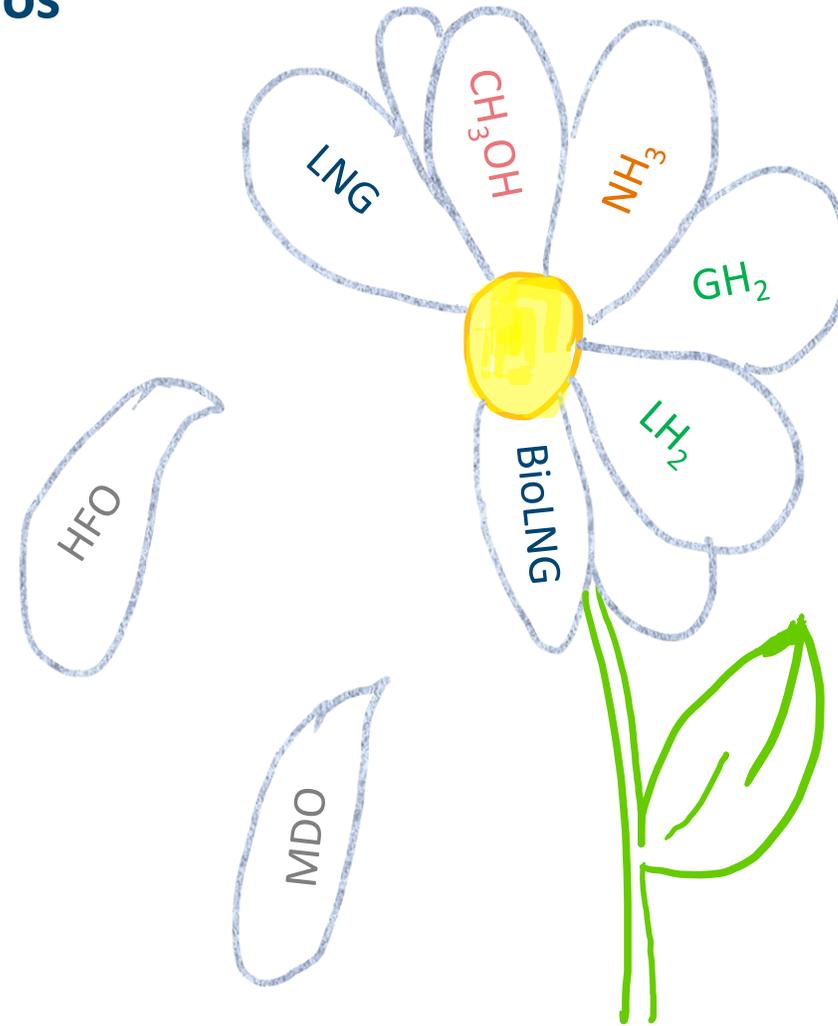
## Nuevas barreras encontradas



- In 2024, 40% of maritime CO2 emissions will need to be traded at the ETS
- LNG will meet the Fuel EU Maritime GHG intensity limit of energy used on board by a ship until 2035 on Well to wake basis. Blendind with 20 biomethane Will meet requirements beyon 2040

Source Sea LNG “LNG – DELIVERING DECARBONISATION”.

# Combustibles alternativos

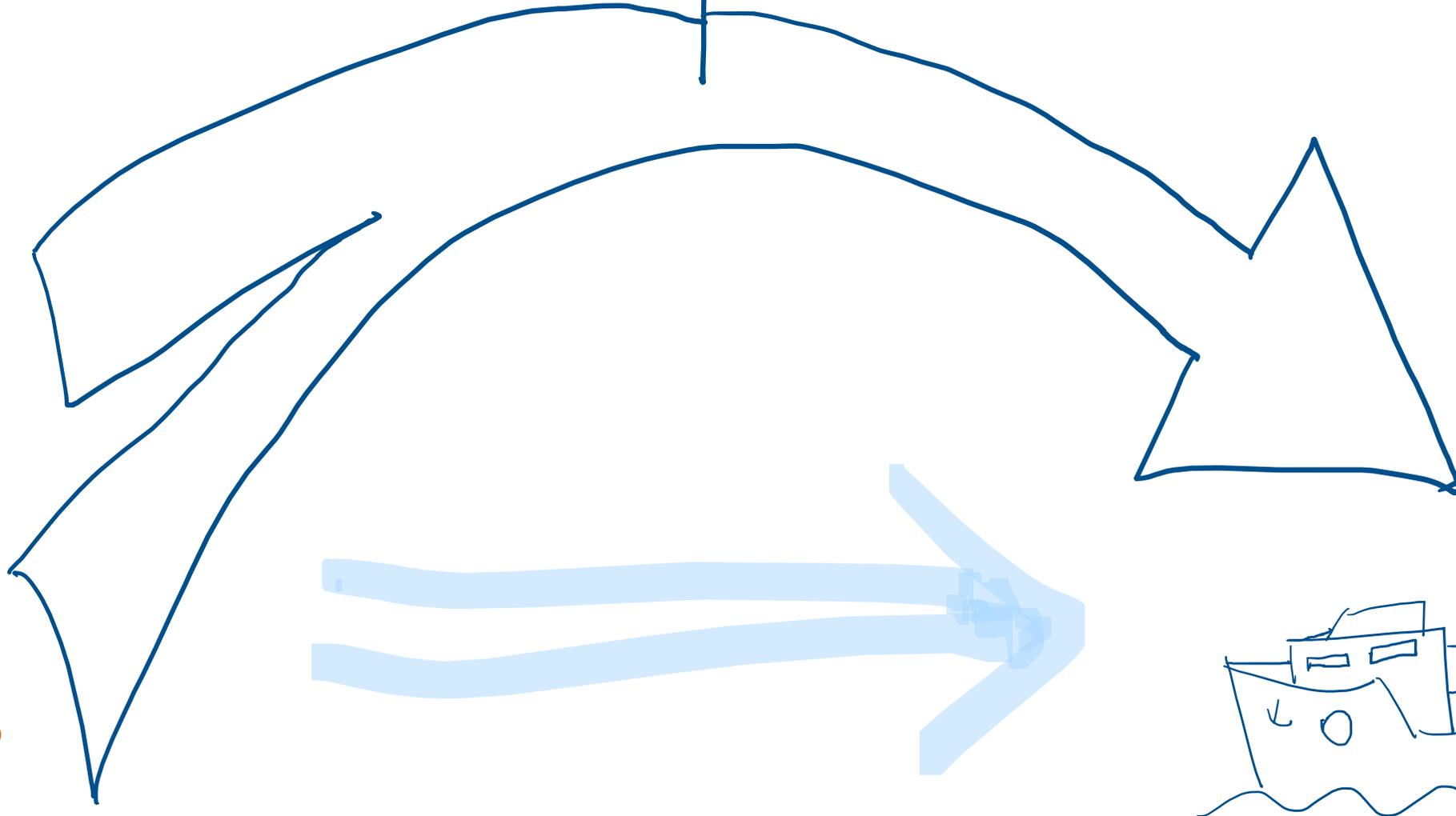


Alternativas para estudiar otros combustibles:  
Aprovechemos la experiencia del GNL

LNG

$H_2$

$NH_3$



## LNG Lecciones aprendidas

- El tiempo disponible es crucial, SIMOPS. El barco se va.
- Las licencias y autorizaciones condicionan las operaciones.
- El precio del GNL es clave.
- Seguridad y Fiabilidad siguen siendo irrenunciables.
- TTS favorece la tan demandada flexibilidad: plazo, cantidad, puerto



## ¿Por qué TTS?

### Actividad de cisternas de GNL en España en 2021



- Mugardos
- Huelva
- Cartagena
- Barcelona
- Sagunto
- Bilbao

50 285 cisternas de GNL cargas en España en 2021 con más de 107 destinos diferentes dentro y fuera del país.

# ¿Por qué TTS?

## Infraestructura actual de GNL en España



 Up to 1.000 satellite plants:  
Spain (up to 900), France,  
Portugal, Italy, Switzerland,  
Andorra, Macedonia

 3,3 Mill m3 total storage cap.

 254 vessels unloaded.

 50 285 trucks loaded.

 1 new LNG Bunker Barge  
Now in service

 1 LNG Bunker Barge  
under construction



Called to offsetting  
the pandemic effect

Now in service

 Operating

 Stand by

 Under construction

# ¿Por qué TTS?

## Puertos que realizan operaciones de Bunkering de GNL



16 Puertos en España ya han recibido cargamentos de GNL para operaciones de Bunkering

# Características del hidrógeno y amoniaco

	GNL	Ammonia	L H <sub>2</sub>	G H <sub>2</sub>
Storage temperature (°C)	-161	-34 ó 20	-253	20
Storage pressure (bar)	1	1 ó 10	1	350
Density (kg/m <sup>3</sup> )	431	682	70,8	24
Energy density (MJ/kg)	56,69	18,6	120	120
Volumetric energy density (GJ/m <sup>3</sup> )	24,43	12,7	8,5	2,88
Required volume (m <sup>3</sup> )	<b>18</b>	<b>34,63</b>	<b>51,73</b>	<b>152,67</b>
Mass (kg)	<b>7.758</b>	<b>23.614</b>	<b>3.664</b>	<b>3.664</b>
Energy (GJ)	<b>439,75</b>	<b>439,75</b>	<b>439,75</b>	<b>439,75</b>



## Configuraciones para el Bunkering de NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>

Los procedimientos de suministro de amoníaco y H<sub>2</sub> a los buques se han desarrollado para las modalidades de suministro y las configuraciones de equipos que se indican a continuación:

- Suministro de NH<sub>3</sub> líquido presurizado a 10 bares y 15 °C desde un camión cisterna mediante bomba.
- Suministro de NH<sub>3</sub> líquido presurizado a 10 bares y 15 °C desde un camión cisterna por diferencia de presión con un compresor instalado en fase gaseosa.
- Suministro de H<sub>2</sub> comprimido desde un remolque tubular por diferencia de presión.
- Suministro de H<sub>2</sub> comprimido desde un remolque tubular con compresor.
- Suministro de H<sub>2</sub> licuado desde un camión cisterna por diferencia de presión

# Procedimiento de Bunkering del NH<sub>3</sub> y el H<sub>2</sub>. Configuraciones estudiadas.



	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Liquid</li> <li>▪ ΔP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gas</li> <li>▪ Tube trailer</li> <li>▪ ΔP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gas</li> <li>▪ Tube trailer</li> <li>▪ Compressor</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Liquid</li> <li>▪ P = 10 bar</li> <li>▪ Pumped TTS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Liquid</li> <li>▪ P = 10 bar</li> <li>▪ ΔP &amp; compressor</li> </ul>		

# Características del hidrógeno y amoniaco



TIPO DE VARIABLE	NOMBRE VARIABLE	UNIDADES	CISTERNAS DE GNL	CISTERNAS DE NH3		TUBE TRAILER 500 BAR 40 Ft		CISTERNAS DE H2L
			DESCARGA CON BOMBA	DESCARGA CON BOMBA	DESCARGA POR DIFERENCIA DE PRESIÓN	DESCARGA POR DIFERENCIA DE PRESIÓN	DESCARGA CON COMPRESOR	DESCARGA POR DIFERENCIA DE PRESIÓN
ENTRADA USUARIO	ENERGÍA COMBUSTIBLE A CARGAR	kWh	298000	298000	298000	298000	298000	298000
		MJ	1072800	1072800	1072800	1072800	1072800	1072800
ENTRADA USUARIO /POR DEFECTO	DENSIDAD COMBUSTIBLE	kg/m3	450	618	618	32,4	32,4	70,8
ENTRADA USUARIO/POR DEFECTO	PODER CALORÍFICO COMBUSTIBLE	MJ/kg	56,69	18,6	18,6	120	120	120
		kWh/kg	15,75	5,17	5,17	33,33	33,33	33,33
CALCULADA	VOLUMEN COMBUSTIBLE A CARGAR	m3	42,05	93,33	93,33	275,93	275,93	126,27
CALCULADA	MASA COMBUSTIBLE A CARGAR	kg	18923,97	57677,42	57677,42	8940,00	8940,00	8940,00
ENTRADA USUARIO/POR DEFECTO	VOLUMEN ÚTIL VEHÍCULO	m3	42	32,44	32,44	34,84	34,84	56,5
ENTRADA USUARIO/POR DEFECTO	MASA COMBUSTIBLE VEHÍCULO	kg	18.900	20.050	20.050	1.129	1.129	4.000
ENTRADA USUARIO/POR DEFECTO	GRADO DE DESCARGA VEHÍCULO	%	100	100	100	60	100	100
CALCULADA	ENERGÍA COMBUSTIBLE VEHÍCULO	kWh	297622,50	103591,67	103591,67	37633,33	37633,33	133333,33
CALCULADA	Nº DE CISTERNAS/VEHÍCULOS DE SUMINISTRO	-	1	3	3	13	8	2
ENTRADA USUARIO/POR DEFECTO	CAUDAL DE DESCARGA	kg/h	13500	12360	24720	30	100	4248
		m3/h	30	20	40	-	-	60
CALCULADA	TIEMPO DE DESCARGA	h	1,40	4,67	2,33	298,00	89,40	2,10

# Ejemplo 1: Bunkering TTS en un ferry

## GNL



4 camiones, 20 T cada uno

6 horas

## NH<sub>3</sub>



9 Camiones, 24 T cada uno,

11 horas

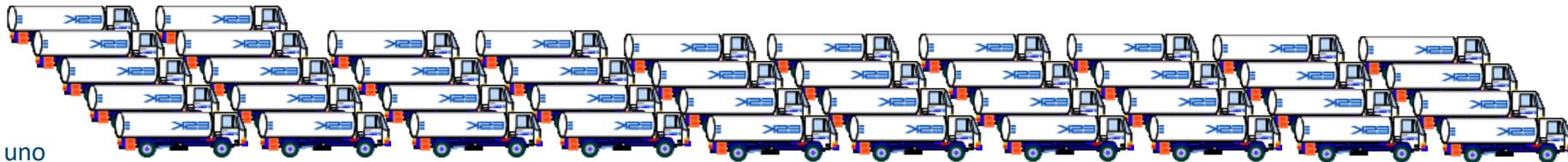
## H<sub>2</sub>L



12 Camiones, 2,8 T cada uno,

14 horas

## H<sub>2</sub>G



43 Camiones, 0,8 T cada uno

> 2 días

2 x 150 m<sup>3</sup> ST

Carga 180 m<sup>3</sup>

= 1 125 MWh

## Ejemplo 2. TTS Bunkering a un **remolcador**

LNG Bunkering features:  
 2 trucks per week  
 2 hours at the port terminal  
 0,66 h for unloading



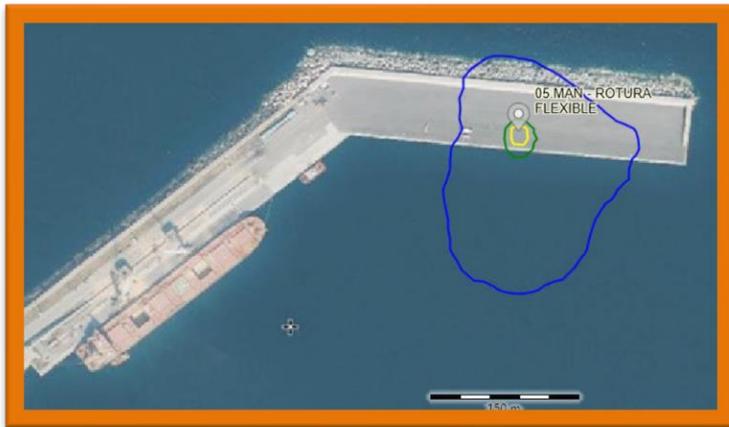
NH3 pumped



NH3 compressed



- 1E-9 /year
- 1E-8 /year
- 1E-7 /year
- 1E-6 /year



LNG



H2 liq pumped



H2 gas

- 1E-9 /year
- 1E-8 /year
- 1E-7 /year
- 1E-6 /year

## Ejemplo 2. TTS Bunkering a un **remolcador**

Las conclusiones, *EN TERMINOS DE RIESGO INDIVIDUAL* (no operativos), de los diferentes tipos de operaciones planteadas son:

- TODAS las operaciones de bunkering planteadas (para el caso planteado del remolcador) son ACEPTABLES desde el punto de vista de riesgo individual y cumplen con los criterios de aceptabilidad definidos en el apartado 8.1.
- Las curvas asociadas al GNL y al LH2 parecen comparables entre sí en términos de distancias, siendo las operaciones con curvas más limitadas tanto en distancia como en probabilidad, favoreciendo posibles SIMOPS <sup>(1)</sup>.
- Las curvas asociadas al NH3 (bomba y compresor) son comparables entre sí, si bien generan distancias mayores y una mayor probabilidad de riesgo individual. Obviamente esto deriva de las características tóxicas del NH3 y podría afectar a posibles SIMOPS y al tipo de embarcación en el que usar este combustible.
- Las curvas asociadas al GH2 son las mayores en términos de distancias, de todas las operaciones planteadas, derivado de la diferencia de exposición a los riesgos provocada por la duración de la operación de bunkering.

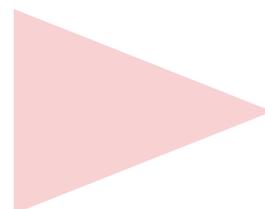
Las conclusiones, *EN TERMINOS OPERATIVOS* y sin entrar de manera muy específica en términos tecnológicos, son:

- Si bien las operaciones de bunkering de GNL, LH2 y NH3 (bomba y compresor) son comparables entre sí en términos de operaciones necesarias (1 cisterna por operación) y tiempos necesarios para su realización (oscilando entre los 40-100min/operación), la operación de bunkering de GH2 no resulta viable al ser necesarios al menos 3 TUBE TRAILER (modelo usado CONT40-T4) y durar cada operación como mínimo >4 horas (teniendo que disponer de un compresor de muy alta capacidad – coste - por parte del Puerto)

## QRA, Análisis Cuantitativo de Riesgo

- El objetivo final de la ERC es determinar el valor del riesgo (expresado en términos de víctimas humanas al año) originado por un accidente en función del producto de:

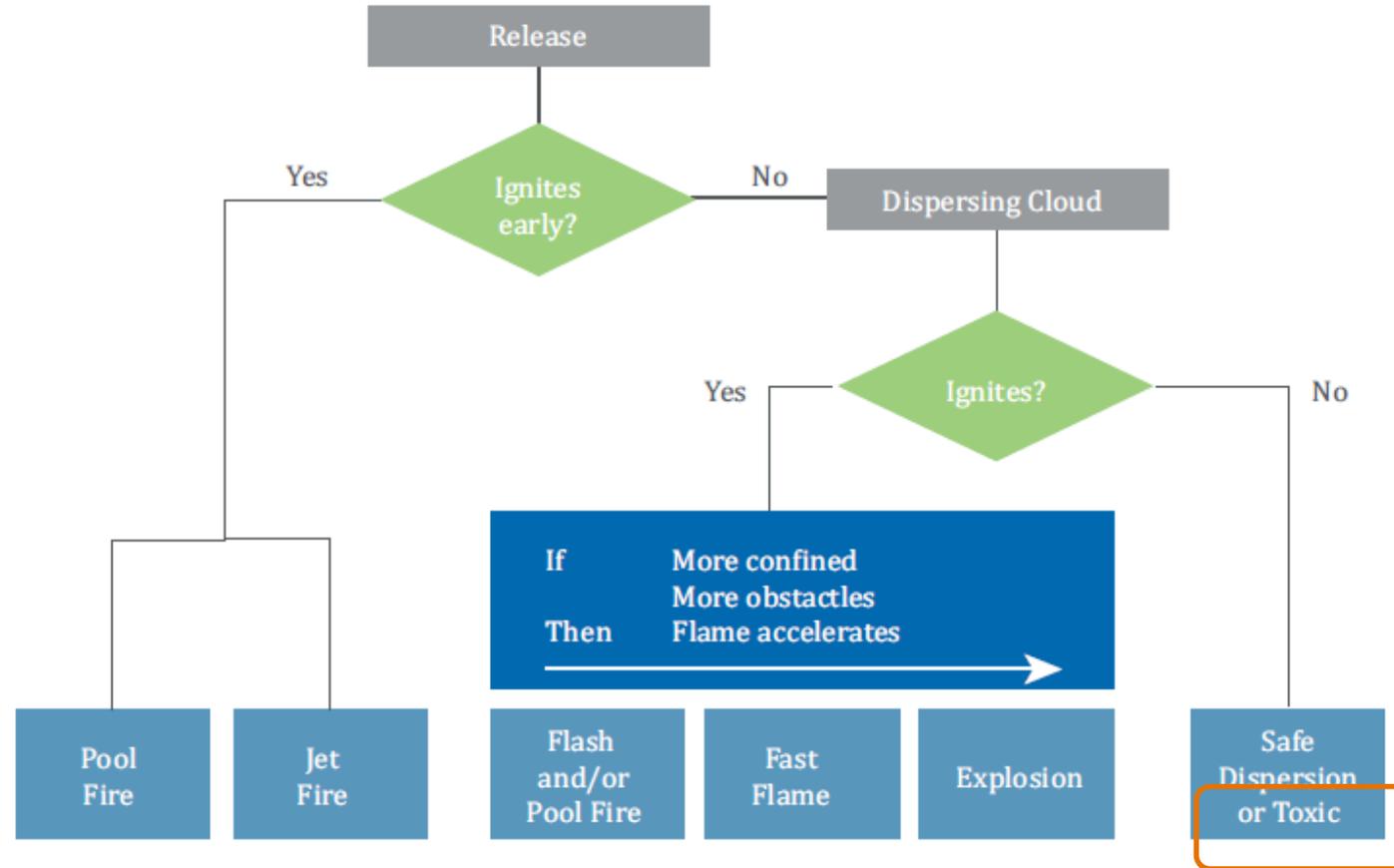
- la probabilidad de ocurrencia, por
- el daño asociado.



Riesgo

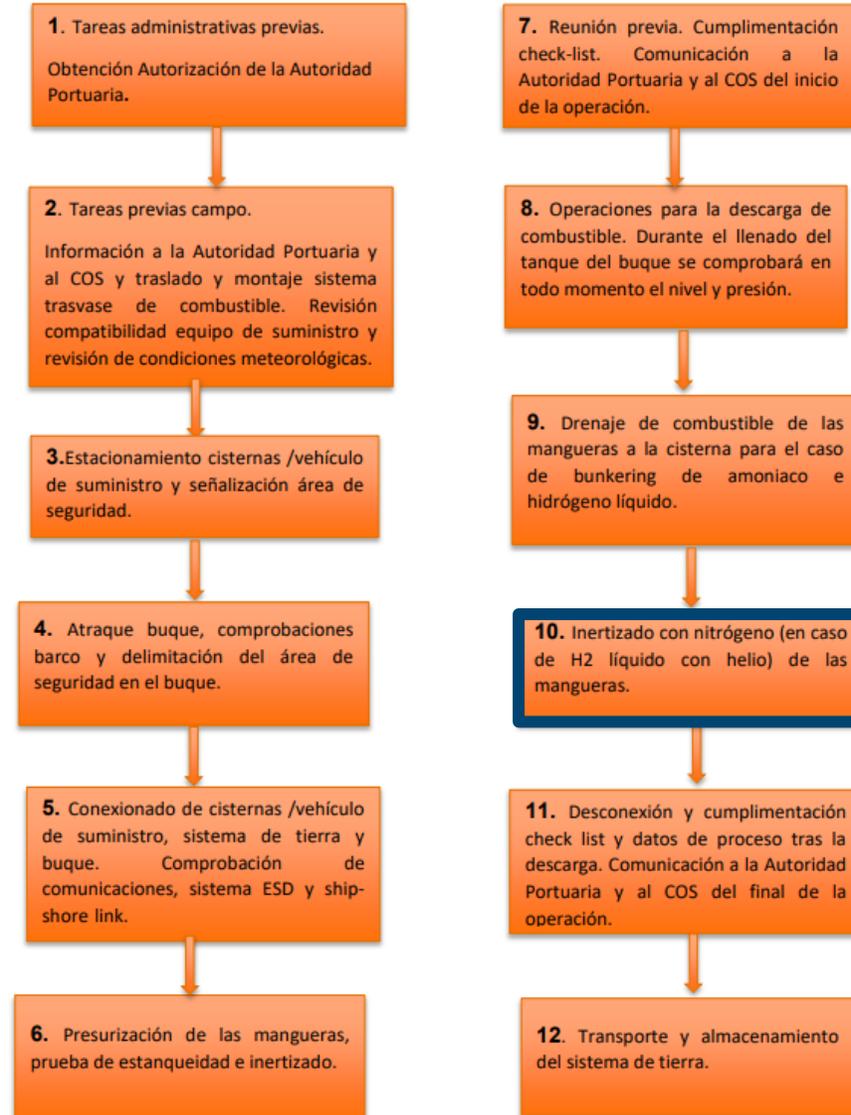
- En particular, en el presente estudio se determinará el denominado riesgo individual, entendido como la determinación del riesgo de muerte para una persona situada a la intemperie en un lugar concreto el 100% del tiempo.
- Este riesgo puede representarse en forma de curvas isorriesgo individuales. Este indicador de riesgo es función de la distancia entre la persona expuesta y los distintos accidentes posibles dentro de la instalación, independientemente de la presencia de personas en las inmediaciones de la instalación.
- En este estudio, tras realizar los cálculos, se trazan las curvas de frecuencia 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup>, 10<sup>-6</sup>, 10<sup>-7</sup>, 10<sup>-8</sup> y 10<sup>-9</sup> años según las Directrices para la evaluación cuantitativa del riesgo "Purple Book".

# General Scheme



# NH3 y H2. Personal y Operaciones

- Personal que participa en una operación de bunkering:
  - Capitán del buque
  - Jefe de máquinas del buque.
  - Responsable de la operación de suministro (ROS).
  - Conductor de la cisterna / vehículo de suministro.
  - Coordinador de la Operación de Suministro (COS)
  - Autoridad Portuaria
  - Centro de Control de Emergencias del Puerto (CCE).
- Las actividades requeridas para realizar el suministro de combustible a un buque se resumen a continuación, que son **similares a las realizadas en un bunkering de GNL**.



# NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>. Procedimientos

- Las principales diferencias y particularidades con respecto a un procedimiento de bunkering de GNL tienen que ver con la diferencia de **inflamabilidad, toxicidad y condiciones de proceso del combustible**.

Bunkering de **amoníaco**

# NH<sub>3</sub>

Equipos de protección individual

- Debido a su **elevada toxicidad**, la importancia de utilizar **detectores específicos**, electroquímicos para concentraciones de NH<sub>3</sub> de hasta 300 ppm y catalíticos hasta 10.000 ppm. Durante la operación, se vigilará siempre la ausencia de fugas en las conexiones. Si la concentración es superior a 20 ppm, se detendrá la operación.
- Utilización de **trajes específicos** en función de la concentración de NH<sub>3</sub> (+ATEX) (traje de nivel II tipo 3 hasta 50 ppm, para una concentración superior traje de nivel 1A tipo III).



**Normal operation**

Level II type 3 suit



**Emergency**

level 1A type III suit

## NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>. Procedimientos

- ✓ Máscara facial completa con filtro de gas (para una concentración de gas de 5.000 ppm-40 minutos)/Conjunto de respiración autónoma para una concentración/tiempo de exposición más elevados.



NH<sub>3</sub>

- ✓ Uso de una manga de viento que indique la intensidad y dirección del viento en caso de fuga.
- ✓ Botella lavaojos portátil, estación lavaojos / ducha de emergencia.



- ✓ Utilización de cortinas de agua como medida de control en caso de fuga.
- ✓ Operación de inertización: Se realizará con nitrógeno y el contenido de combustible deberá ser inferior a 20 ppm (0,002%).

## ▪ Bunkering de H<sub>2</sub>



### Equipos de protección individual

- Debido a su alto grado de inflamabilidad, se destaca la importancia de utilizar detectores catalíticos específicos de H<sub>2</sub>.
- Durante la operación se vigilará siempre la ausencia de fugas en las conexiones.
- Utilización de una **cámara termográfica** para identificar fugas de gas en los puntos de unión durante la operación de bunkering.
- Operación de inertización en el caso del bunkering de LH<sub>2</sub>: **La inertización se realizará con helio** ya que a la temperatura de suministro del LH<sub>2</sub>, en torno a -253°C, puede condensar e incluso solidificar el nitrógeno. El contenido de combustible debe ser inferior al 0,4% (fracción volumétrica). Fugas de hidrógeno: A partir del 10% del límite inferior de explosividad del hidrógeno existe riesgo para las personas y la operación debe detenerse inmediatamente.
- Si se detecta una concentración de hidrógeno superior al 0,4% (4.000 ppm) por volumen de aire, la operación debe detenerse.

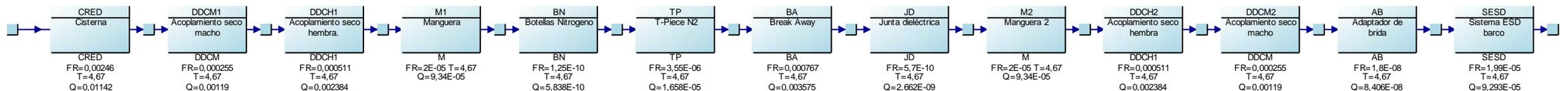
# Fiabilidad de los Equipos

$$u(FF) = 1 - e^{-\lambda_{FF} * t} \approx \lambda_{FF} * t$$

- **OREDA** (Offshore Reliability Data) (OREDA, 2015)
- **NPRD** (Nonelectronic Parts Reliability Data) (NPRD, 1991). Base de datos del RAC (Reliability Analysis Center)
- **Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments** (FRED, 2019). Base de datos gestionada por el HSE (Health and Safety Executive) británico.
- **HyRAM** (Groth & Hecht, 2017) es una metodología y su implementación en un software para la evaluación de la seguridad de infraestructuras de almacenamiento y abastecimiento de hidrógeno.
- **Guidelines for Process Equipment Reliability Data by CCPS** (CCPS, 2010). Libro publicado por el CCPS (Center for Chemical Process Safety) enfocado a la fiabilidad de componentes en la industria química para su uso en el análisis cuantitativo de riesgo.

TTS de NH3 mediante descarga por bomba (NH3CRED).

TASA FALLO EQUIPOS		FUENTE	TASA FALLOS EN FUNCIONAMIENTO	TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO	INDISPONIBILIDAD
CODIGO	EQUIPO		$\lambda_{FF}$ (fallos/h)	t(h)	u
CRED	CISTERNA NH3 (sin DDCM)	Genérico	2,46E-03	4,67	1,15E-02
DDCM	Acoplamiento seco macho	Específico	2,55E-04	4,67	1,19E-03
DDCH	Acoplamiento seco hembra	Específico	5,11E-04	4,67	2,39E-03
M	Manguera	Genérico	2,00E-05	4,67	9,34E-05
TP	Skid T-piece N2	Genérico	3,55E-06	4,67	1,66E-05
BA	Breakaway	Específico	7,67E-04	4,67	3,58E-03
JD	Junta dieléctrica	Genérico	5,70E-10	4,67	2,66E-09
AB	Adaptador de brida	Genérico	1,80E-08	4,67	8,41E-08
BN	Botella de nitrógeno	Genérico	1,25E-10	4,67	5,84E-10
SESD	Sistema ESD	Genérico	1,00E-05	4,67	9,20E-05



# Fiabilidad Humana

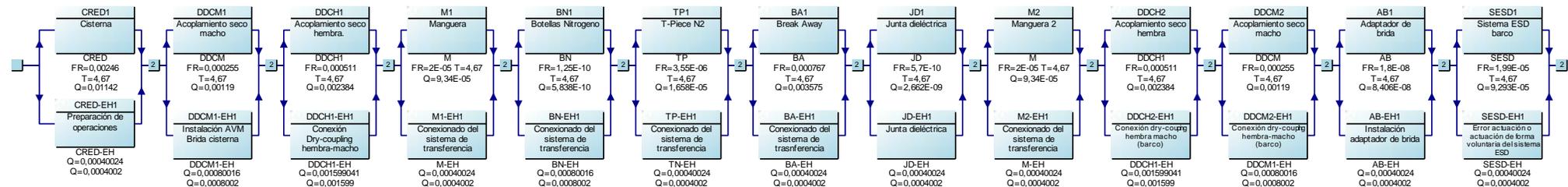
PSF (Performance Shaping Factors), son un total de ocho e incluyen:

- Tiempo disponible
- Stress
- Complejidad
- Experiencia y entrenamiento
- Procedimientos
- Ergonomía
- Motivación
- Proceso

$$\alpha = \frac{NPEH \cdot PSF_{compuesto}}{NPEH (PSF_{compuesto} - 1) + 1}$$

TTS de NH3 mediante descarga por bomba (NH3CRED)

CÓD.	EQUIPO	Tiempo disponible	M	Stress	M	Complejidad	M	Experiencia	M	Procedimientos	M	Ergonomía	M	Motivación	M	Proceso	M	NHEP	α(-)
CRED	CISTERNA NH3 (sin DDCM)	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Alta	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
DDCM	Acoplamiento seco macho	Nominal	1	Alto	2	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	8,00E-04
DDCH	Acoplamiento seco hembra	Nominal	1	Alto	2	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	1,60E-03
M	Manguera	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
TP	Skid T-piece N2	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
BA	Breakaway	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
JD	Junta dieléctrica	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
AB	Adaptador de brida	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04
BN	Botella de nitrógeno	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	8,00E-04
SESD	Sistema ESD	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Nominal	1	Buena	0,5	Nominal	1	Bueno	0,8	0,001	4,00E-04



## Factor de Disponibilidad

CONFIGURACIÓN	FACTOR DE FIABILIDAD SIN ERRORES HUMANOS (%)	FACTOR DE DISPONIBILIDAD CON ERRORES HUMANOS (%)
NH3CRED	97,77	96,92
NH3CRPD	98,37	96,58
H2CDP	26,87	26,61
H2COM	67,06	66,31
H2LDP	99,08	98,29

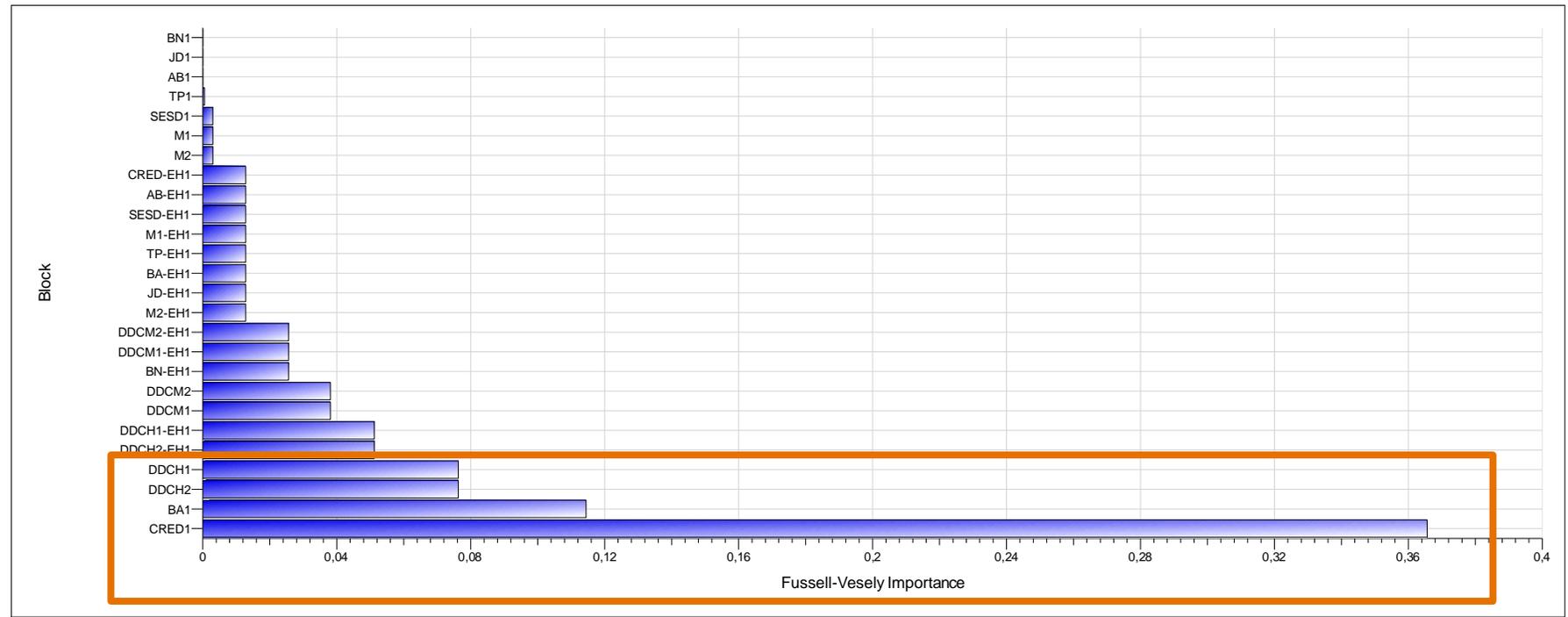
# Análisis de Sensibilidad

Definición	Nombre alternativo
$B_x = U_1(x) - U_0(x)$	Birnbaum
$C_x = (U_n - U_0(x)) / U_n$	Fussell-Vesely importance

Esta medida permite concluir que equipos son los más importantes desde el punto de vista de la disponibilidad de cada configuración de bunkering

## TTS de NH3 mediante descarga por bomba (NH3CRED)

### NH3CRED-EH Fussell-Vesely Importance



# Análisis de importancia

$$CB_i = Coste_i / (R_i - R)$$

TTS de NH3 mediante descarga por bomba (NH3CRED)

COD	Repuesto	R (%)	Ri (%)	Ri-R (%)	Coste (€)	CBi
CRED	CISTERNA NH3 (sin DDCM)	96,916	98,023	1,107	100.000	90.334,24
DDCM	Acoplamiento seco macho	96,916	97,147	0,231	668	2.891,77
DDCH	Acoplamiento seco hembra	96,916	97,379	0,463	3.048	6.583,15
M	Manguera	96,916	96,934	0,018	3.000	166.666,67
TP	Skid T-piece N2	96,916	96,918	0,002	3.100	1.550.000,00
BA	Breakaway	96,916	97,263	0,347	2.202	6.346,69
JD	Junta dieléctrica	96,916	96,916	0	350	inf
AB	Adaptador de brida	96,916	96,916	0	850	inf
BN	Botella de nitrógeno	96,916	96,916	0	107	inf

Permite priorizar los repuestos óptimos desde el punto de vista de su repercusión sobre el incremento del factor de disponibilidad de la configuración en relación con su coste de adquisición

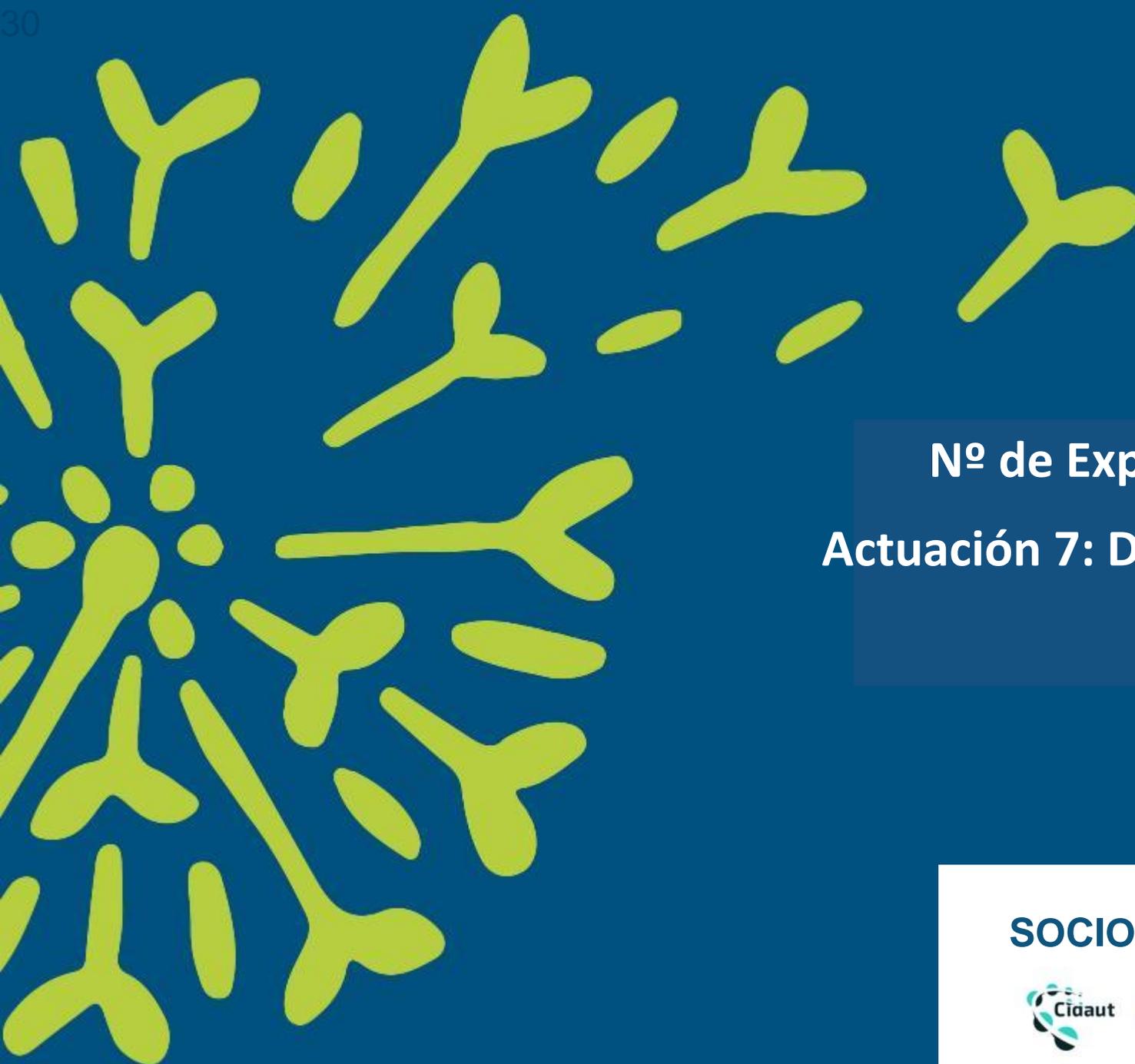
# Conclusiones

## 1. En cuanto al **factor de disponibilidad**:

- La configuración de bunkering de amoníaco con descarga por bomba (NH3CRED) es la que mayor factor de disponibilidad presenta.
- En lo que respecta al hidrógeno, la configuración de bunkering de hidrógeno líquido con descarga mediante diferencia de presión (H2LDP) es la que mayor factor de disponibilidad presenta, además, la descarga de hidrógeno comprimido mediante compresor (H2COM) tiene un factor de disponibilidad muy bajo como consecuencia del elevado tiempo de descarga requerido, algo parecido a lo que ocurre para la configuración H2CDP.

## 2. Del **análisis de importancia** de equipos utilizando la medida Fussell-vesely, para la configuración NH3CRED se observa que el fallo en funcionamiento de la cisterna de NH3 (CRED) es el más importante, seguido por el fallo del equipo breakaway (BA) , el fallo de los acoplamientos secos hembra (DDCH) y el error humano en este acoplamiento (DDCH-EH).

## 3. Del **análisis riesgo-coste-beneficio** para cada una de las configuraciones, se concluye que, de forma general, aunque con diferente importancia, para cada configuración los repuestos óptimos son los acoples hembra y macho y el breakaway. Ello es debido a que la fiabilidad inicial es ya muy alta y la reducción que el aumento de fiabilidad que se produce con el repuesto es muy pequeña, por lo que el factor clave es el coste, primándose soluciones de bajo coste.



# NEWBunker

Nº de Expediente: AEI-010500-2022b-278

Actuación 7: DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.

## SOCIOS







**Methanol, Biomethane** and Synthgases are next in line in the study.

SIBUNKER as an open platform for automation of the reliability calculations.

We are gathering field data to improve the functionality. Open to collaborations.

**Web tool** comparing Bunkering operations with different type of fuels.

## Further steps





## Gracias

Esta presentación es propiedad de Naturgy Energy Group, S.A.  
Tanto su contenido como su diseño están destinados al uso exclusivo de su personal.

© Copyright Naturgy Energy Group, S.A.