

Corso di Impiego Industriale Dell'Energia



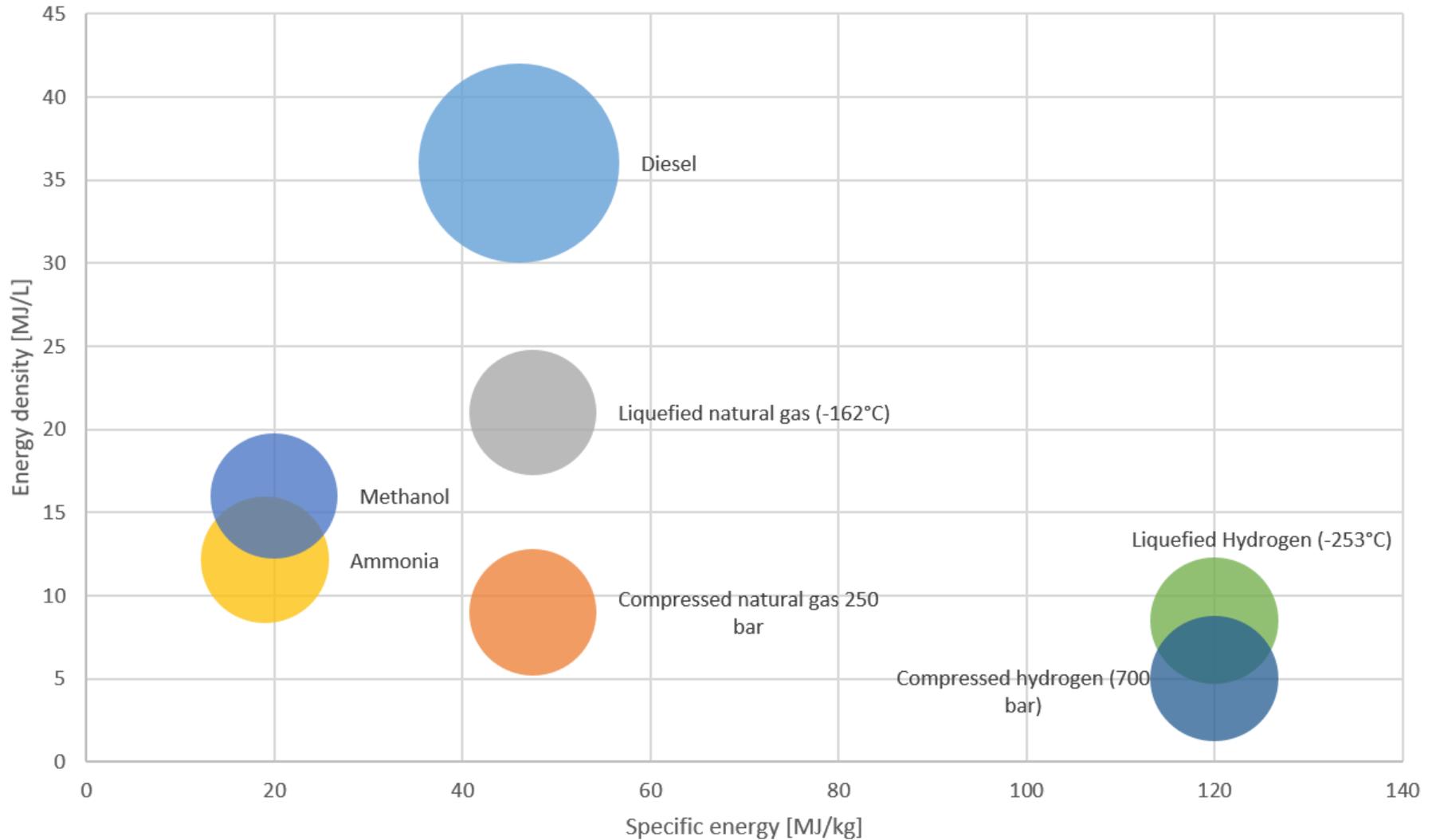
Combustibili alternativi – Gas naturale

Prof. Rodolfo Tacconi

Ing. Pivetta Davide

AA 2021-2022

Caratteristiche combustibili



COMPOSIZIONE DEL GAS NATURALE

Composizione indicativa					
	Formula chimica	Gas nazionale	Gas sovietico	Gas olandese	Gas algerino
Metano	CH_4	99,2%	92,0%	88,85%	83,0%
Etano	C_2H_6	0,4%	3,2%	4,3%	7,5%
Propano	C_3H_8	0,14%	0,85%	0,9%	2,0%
Butano	C_4H_{10}	---	0,2%	0,3%	0,8%
Pentano	C_5H_{12}	---	0,1%	0,1%	0,3%
Esano	C_6H_{14}	---	0,05%	0,05%	0,3%
Anidride carbonica	CO_2	0,11%	0,3%	1,3%	0,2%
Azoto	N_2	0,25%	3,3%	4,2%	6,0%

GAS NATURALE

Indice di Wobbe: è il principale indice dell'intercambiabilità del gas naturale a parità di pressione. E' definito come il rapporto fra il potere calorifico superiore di un gas (PCS) e la radice quadrata della sua densità relativa rispetto alla densità dell'aria in condizioni standard (ρ).

$$I_W = \frac{PCS}{\sqrt{\rho}}$$

METANO

GAS	Densità (kg/Nm ³)	Densità relativa
Ammoniaca	0,771	0,597
Anidride Carbonica	1,997	1,529
Aria	1,293	1,000
Azoto (puro)	1,251	0,967
Butano	2,703	2,091
Idrogeno	0,0899	0,0695
Ossigeno	1,429	1,105
Propano	2,019	1,562
Metano (puro)	0,71	0,551=(0,713/1,293)

La *densità di riferimento* per un gas è definita per Normal metro cubo (Nm³), cioè valutata alla pressione assoluta di 1 bar e alla temperatura di 0°C.

La *densità relativa* è il rapporto fra la densità del gas e quella dell'aria (nelle condizioni Normali).

METANO

METANO: è un idrocarburo che fa parte delle paraffine. È incolore, inodore, non tossico e non corrosivo.

Reazione di ossidazione:



Potere calorifico: quantità di calore sviluppata dalla combustione completa di un normale metro cubo del gas stesso.

HHV = 9.530 kcal/Nm³ = 13.284 kcal/kg

LHV = 8.570 kcal/Nm³ = 11.946 kcal/kg

15.44 kWh/kg

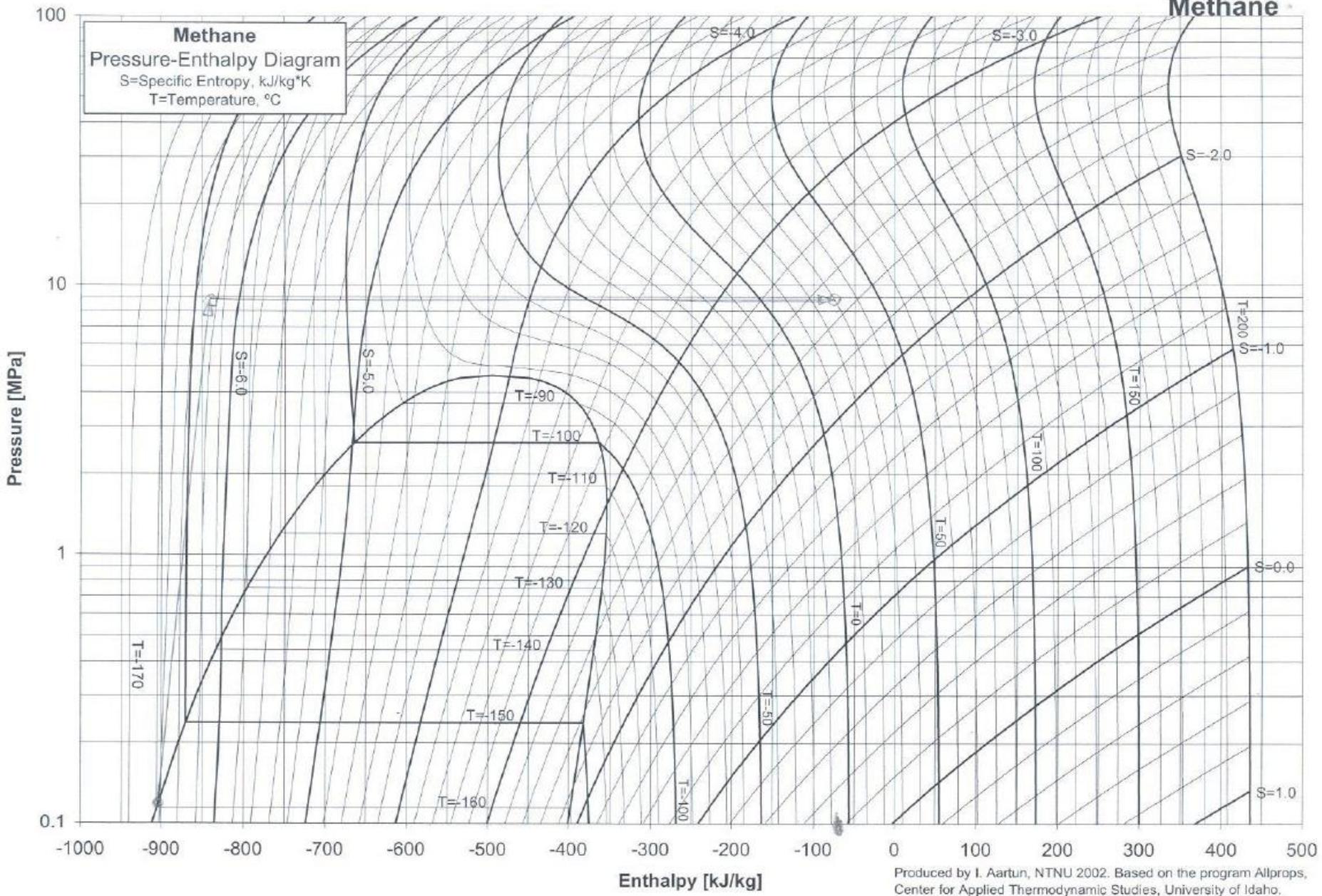
METANO

Potere carburivoro: volume di aria tecnicamente necessario alla combustione completa di 1 Nm³ di gas;

Per gas metano = 10 Nm³ d'aria

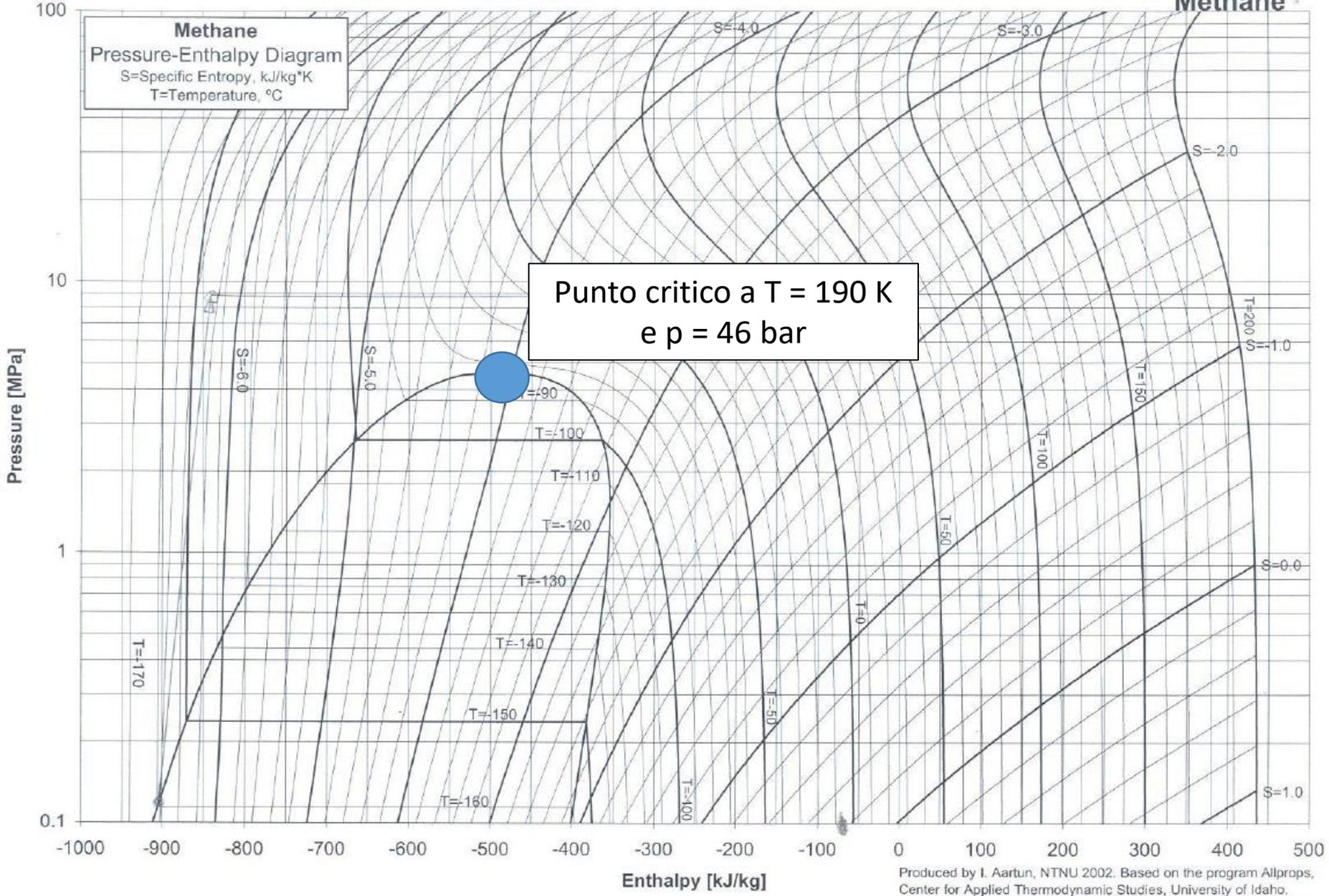
Limite di infiammabilità: definito come il rapporto, in volume, di un combustibile gassoso in una miscela di gas ed aria, sotto od oltre il quale la miscela non si accenderà o non continuerà a bruciare.

Per gas metano = 4,5 - 15% della miscela.



Produced by I. Aartun, NTNU 2002. Based on the program Allprops, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho.

Methane
Pressure-Enthalpy Diagram
S=Specific Entropy, kJ/kg*K
T=Temperature, °C



Punto critico a T = 190 K
e p = 46 bar

Produced by I. Aartun, NTNU 2002. Based on the program Allprops, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho.

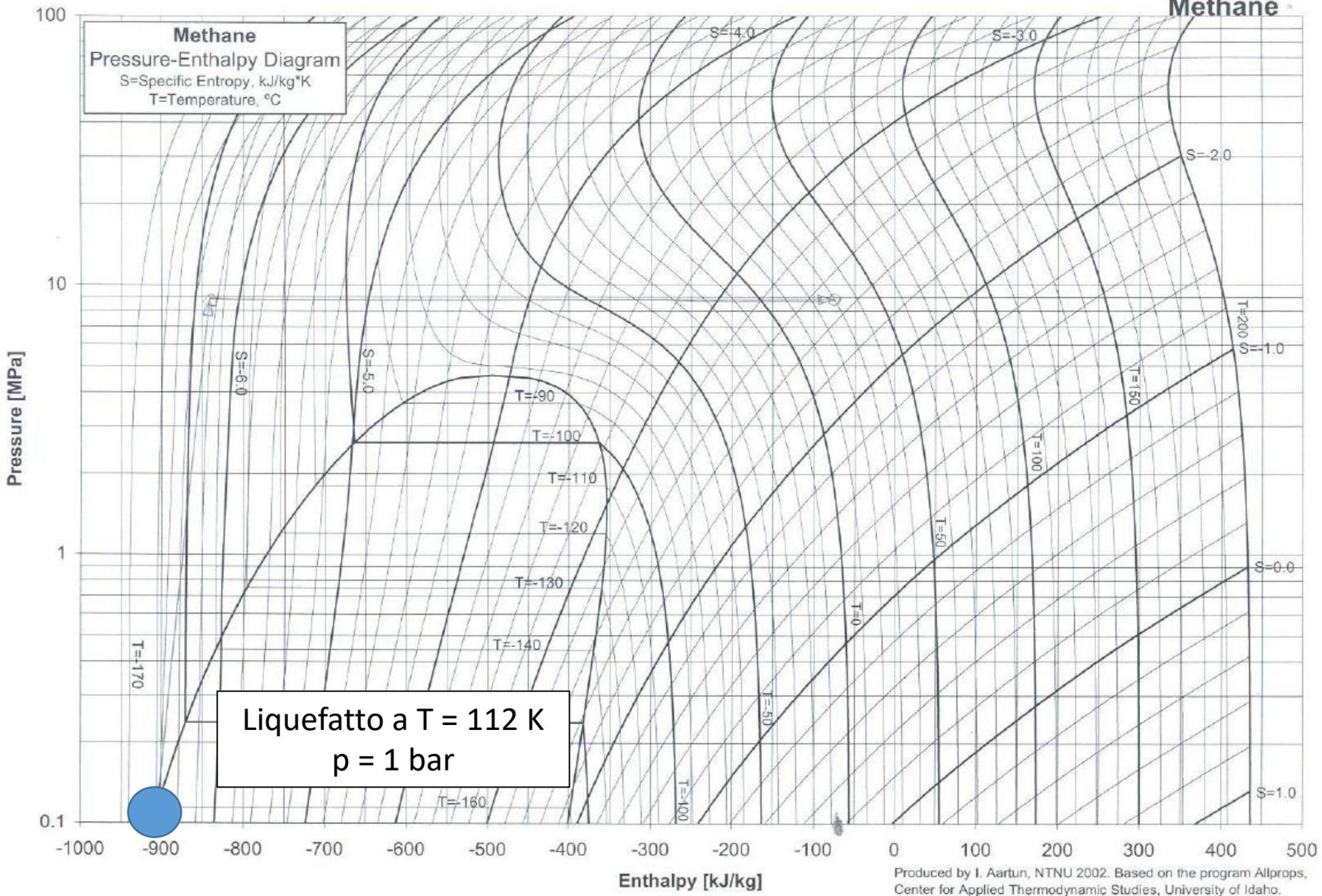
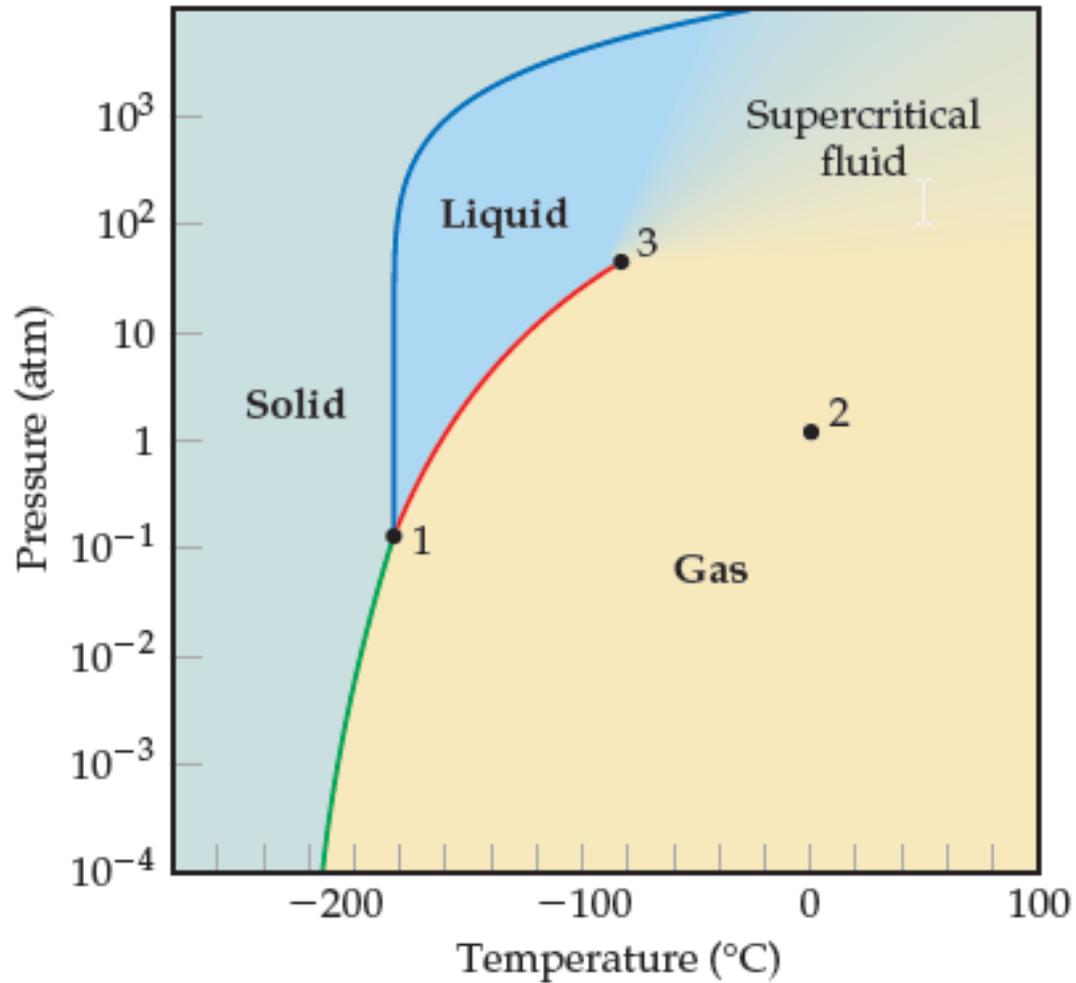


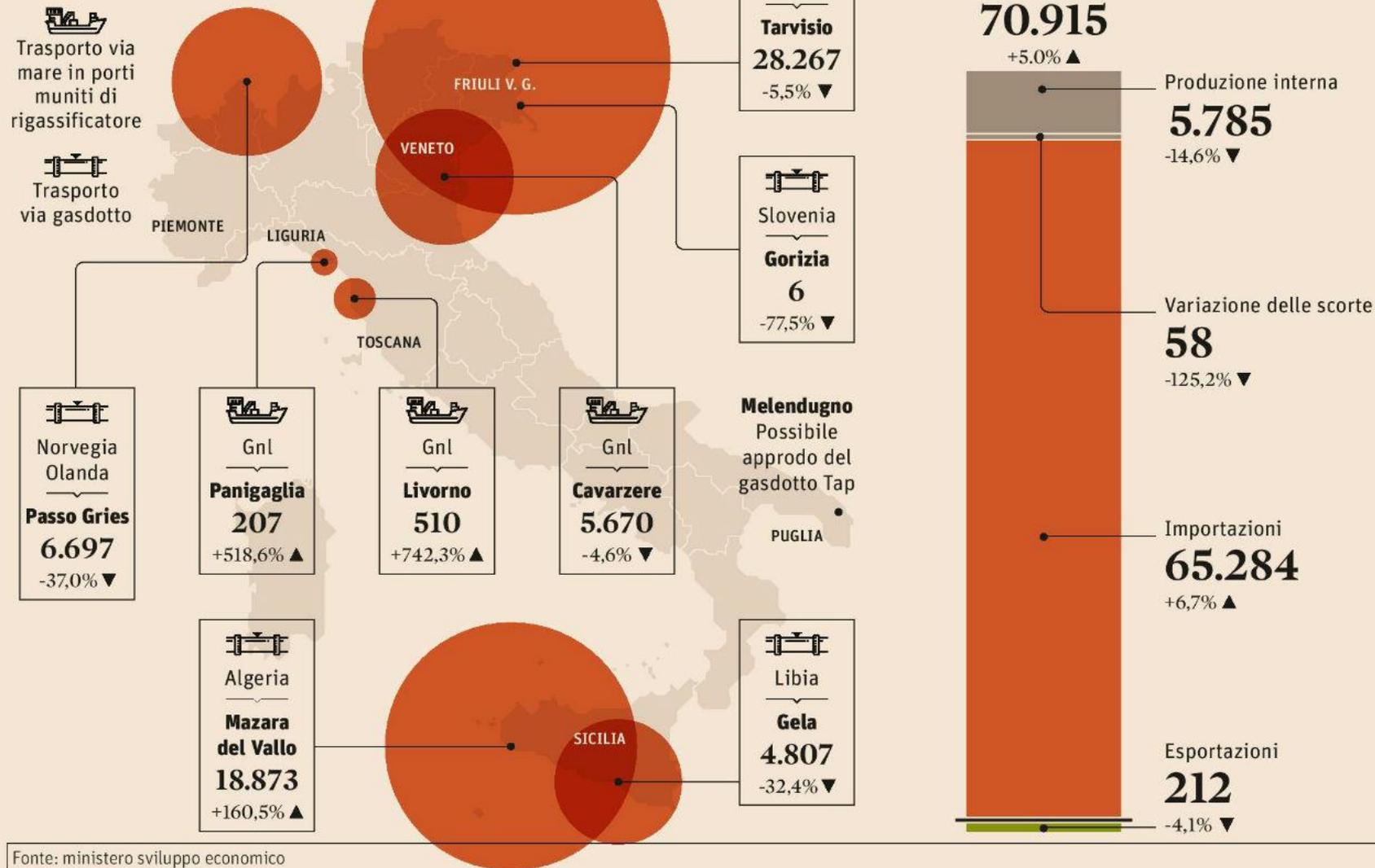
Diagramma di fase del metano



Il bilancio del gas naturale in Italia

I PRINCIPALI PUNTI D'INGRESSO

Dati gennaio-dicembre 2016 in milioni di metri cubi e variazione % sul 2015

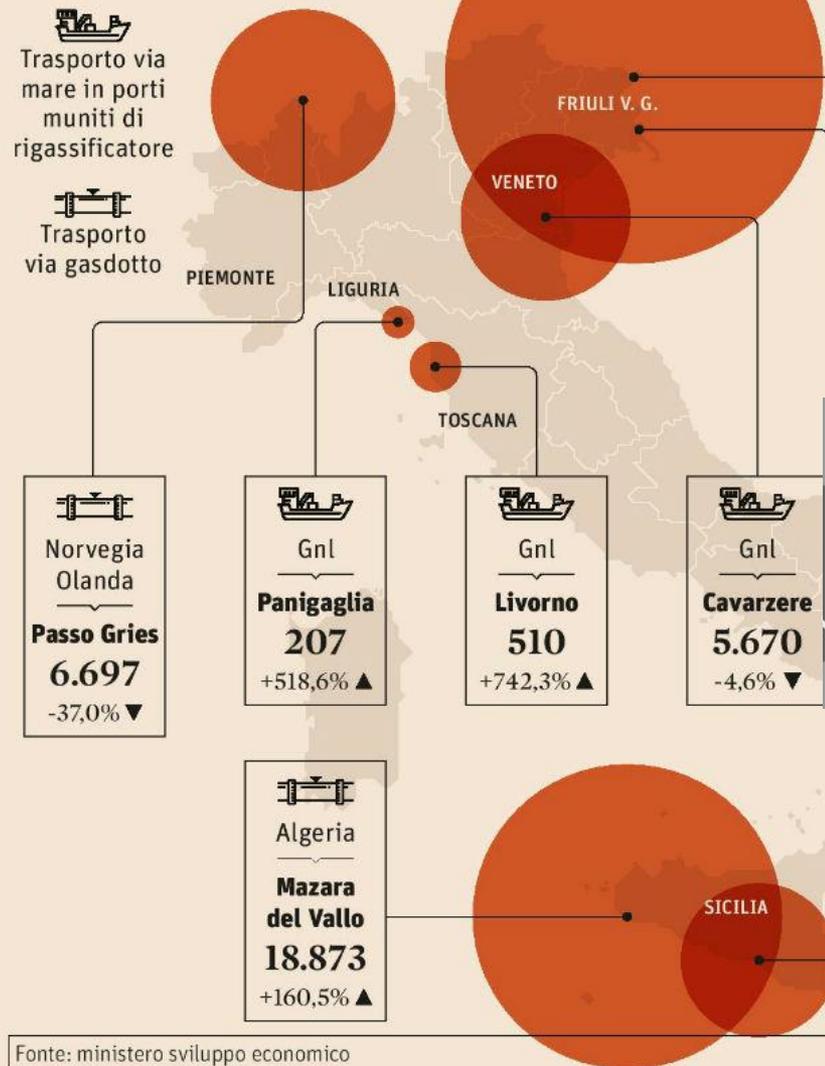


Fonte: ministero sviluppo economico

Il bilancio del gas naturale in Italia

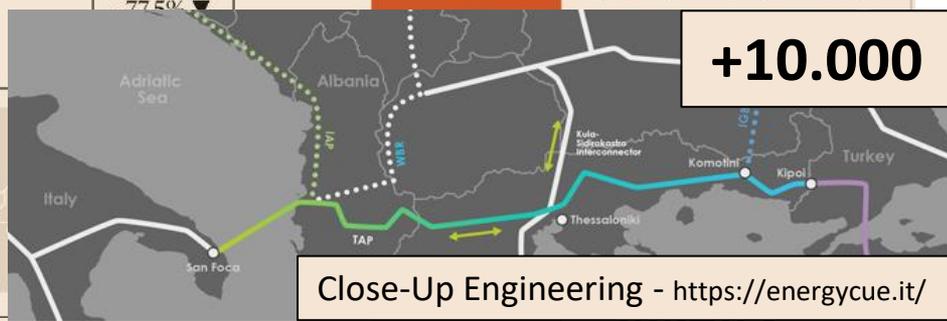
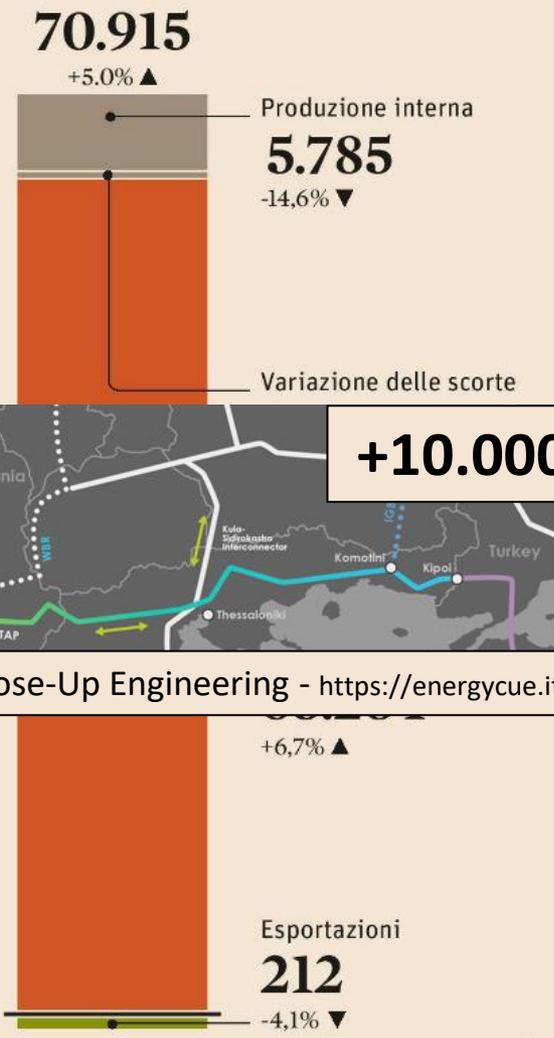
I PRINCIPALI PUNTI D'INGRESSO

Dati gennaio-dicembre 2016 in milioni di metri cubi e variazione % sul 2015



IL CONSUMO INTERNO

Dati gennaio-dicembre 2016 in milioni di metri cubi e variazione % sul 2015



Fonte: ministero sviluppo economico



<https://dgsaie.mise.gov.it/bilancio-gas-naturale>

BILANCIO MENSILE DEL GAS NATURALE						
ITALIA (1)						
(Milioni di Standard metri cubi a 38,1 MJ/mc)						
Gennaio						
			2021	2020	Variaz. %	
a)	PRODUZIONE NAZIONALE (2)		323	364	-11.5%	
b)	IMPORTAZIONI		6,235	5,670	10.0%	
	per punto di ingresso	MAZARA DEL VALLO	1,848	1,306	41.5%	
		GELA	276	373	-26.0%	
		TARVISIO	3,052	1,862	63.9%	
		PASSO GRIES	211	1,134	-81.4%	
		MELENDUGNO	341	-	-	
		PANIGAGLIA (2)	15	94	-83.6%	
		CAVARZERE (2)	484	587	-17.5%	
		LIVORNO (2)	0	310	-100.0%	
		GORIZIA	4	0	697.0%	
		Altri	2	3	-31.3%	
c)	Esportazioni		110	27	310.6%	
d)	Variazione delle scorte (2)		- 3,375	- 3,704	-8.9%	
e) = a)+b)-c)-d)	Consumo Interno Lordo		9,822	9,712	1.1%	
<i>Fonte: Ministero della transizione ecologica - DGISSEG</i>						
(1) Preconsuntivi al netto dei transiti						
(2) comprende consumi e perdite						



<https://dgsaie.mise.gov.it/bilancio-gas-naturale>

**GAS NATURALE TOTALE DISTRIBUITO PER REGIONE
ANNO 2019**

Volumi espressi in M Sm³; gas da 10,57275 25-15 kWh/Sm³ (*)

REGIONI	INDUSTRIALE	TERMOELETRICO	RETI DI DISTRIBUZIONE	T O T A L E
PIEMONTE	1,242.4	3,390.9	3,451.6	8,084.9
VALLE D'AOSTA	61.2	0.0	41.5	102.7
LOMBARDIA	2,695.0	5,546.1	8,370.3	16,611.4
TRENTINO ALTO ADIGE	322.8	25.2	699.3	1,047.3
VENETO	1,417.8	621.0	3,997.5	6,036.3
FRIULI VENEZIA GIULIA	670.4	747.1	828.1	2,245.6
LIGURIA	239.8	393.4	879.6	1,512.8
EMILIA ROMAGNA	2,718.6	3,063.4	4,088.7	9,870.7
TOSCANA	955.0	1,761.0	2,225.8	4,941.8
UMBRIA	283.2	318.0	501.0	1,102.2
MARCHE	371.9	3.1	859.5	1,234.5
LAZIO	588.4	1,000.6	2,133.1	3,722.1
ABRUZZO	414.5	489.6	700.3	1,604.4
MOLISE	14.4	384.5	144.6	543.5
CAMPANIA	443.6	1,158.9	1,193.8	2,796.3
PUGLIA	821.4	2,510.8	1,138.1	4,470.3
BASILICATA	148.5	25.4	213.0	386.9
CALABRIA	48.4	2,611.7	305.1	2,965.2
SICILIA	996.0	1,945.2	757.0	3,698.2
SARDEGNA	0.0	0.0	0.0	0.0
T O T A L E	14,453.3	25,995.9	32,527.9	72,977.1
FONTE:	MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - D.G.I.S.S.E.G.			DIV. III



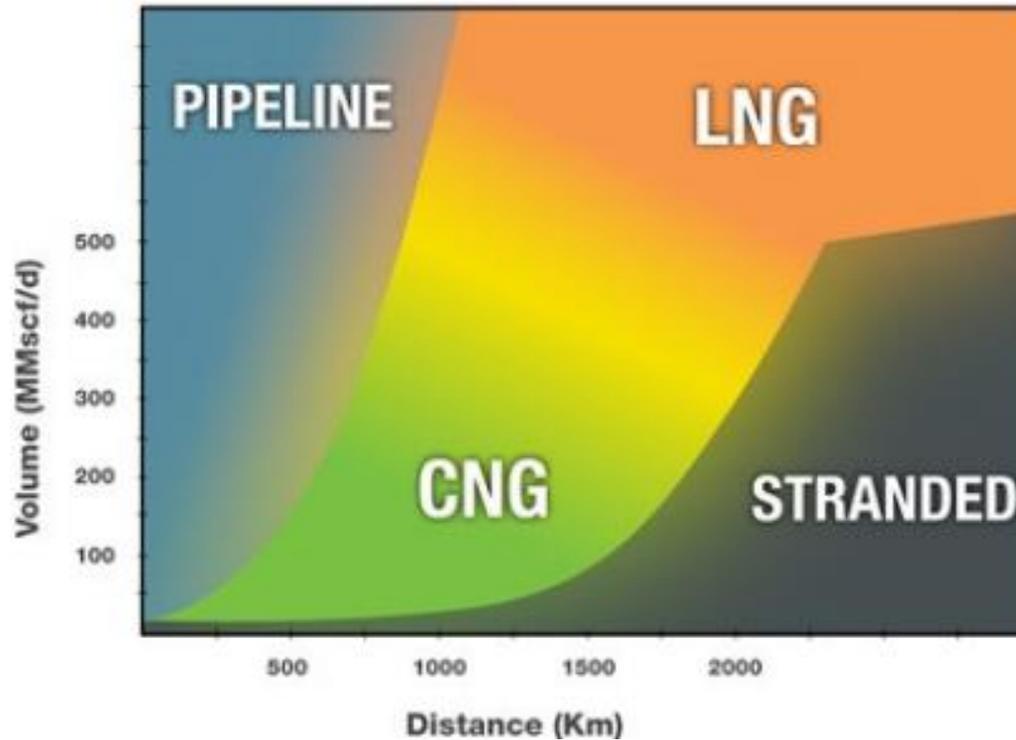
<https://dgsaie.mise.gov.it/bilancio-gas-naturale>

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio
TARVISIO	2,783	1,872	2,730	2,965	3,043	2,525	2,705
PASSO GRIES - MASARA	660	740	904	1,303	1,135	1,321	1,387
MAZARA DEL VALLO	1,732	1,146	490	726	833	714	723
ROVIGO - CAVARZERE	629	512	713	623	616	587	742
GELA	425	394	479	497	552	467	464
OLT LIVORNO	186	268	386	285	270	356	353
PANIGAGLIA	116	182	298	294	249	249	170
VENTIMIGLIA	13	13	13	13	13	14	14
FALCONARA	4	4	4	4	4	3	4
GORIZIA	0	0	0	0	0	1	0
CAGLIARI	0	0	0	0	0	0	0
Totale complessivo	6,549	5,130	6,016	6,710	6,717	6,237	6,561

	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	Totale 2019	Peso %
TARVISIO	2,109	2,557	1,707	2,677	2,159	29,831	42.0%
PASSO GRIES - MASARA	945	601	1,176	460	841	11,474	16.1%
MAZARA DEL VALLO	667	741	637	645	1,153	10,206	14.4%
ROVIGO - CAVARZERE	703	612	624	662	608	7,629	10.7%
GELA	524	444	506	489	460	5,701	8.0%
OLT LIVORNO	277	248	346	287	329	3,593	5.1%
PANIGAGLIA	234	237	163	38	181	2,413	3.4%
VENTIMIGLIA	14	14	14	13	16	163	0.2%
FALCONARA	3	3	3	3	3	42	0.1%
GORIZIA	1	5	7	0	0	15	0.0%
CAGLIARI	0	0	0	0	0	0.2	0.0%
Totale complessivo	5,476	5,461	5,185	5,274	5,750	71,065	100.0%

TRASPORTO DI GAS NATURALE

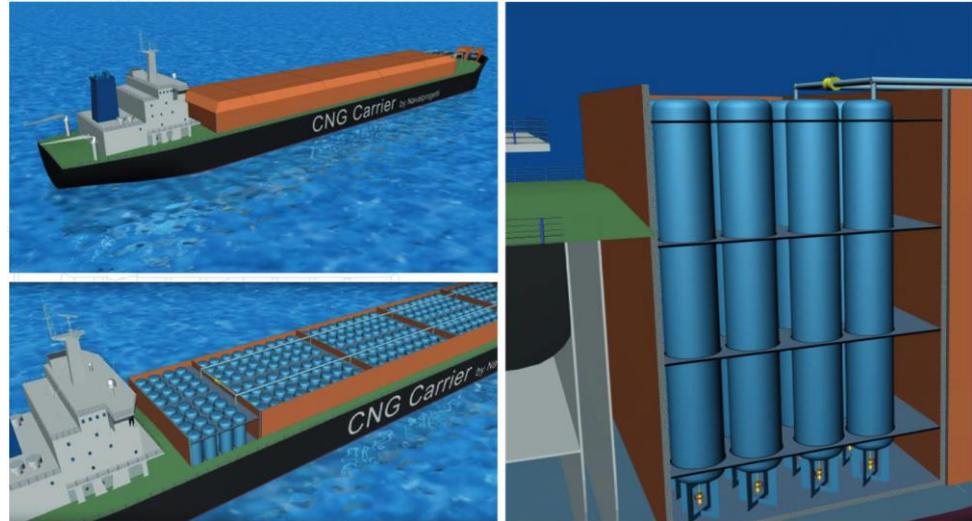
TRASPORTO GAS NATURALE



GASVESSEL Project - <https://www.gasvessel.eu/wp-content/uploads/2018/06/D2.1-Scenario-Description-and-Characterization.pdf>

CNG

(Compressed Natural Gas)



GASVESSEL Project - <https://www.gasvessel.eu/>

LNG

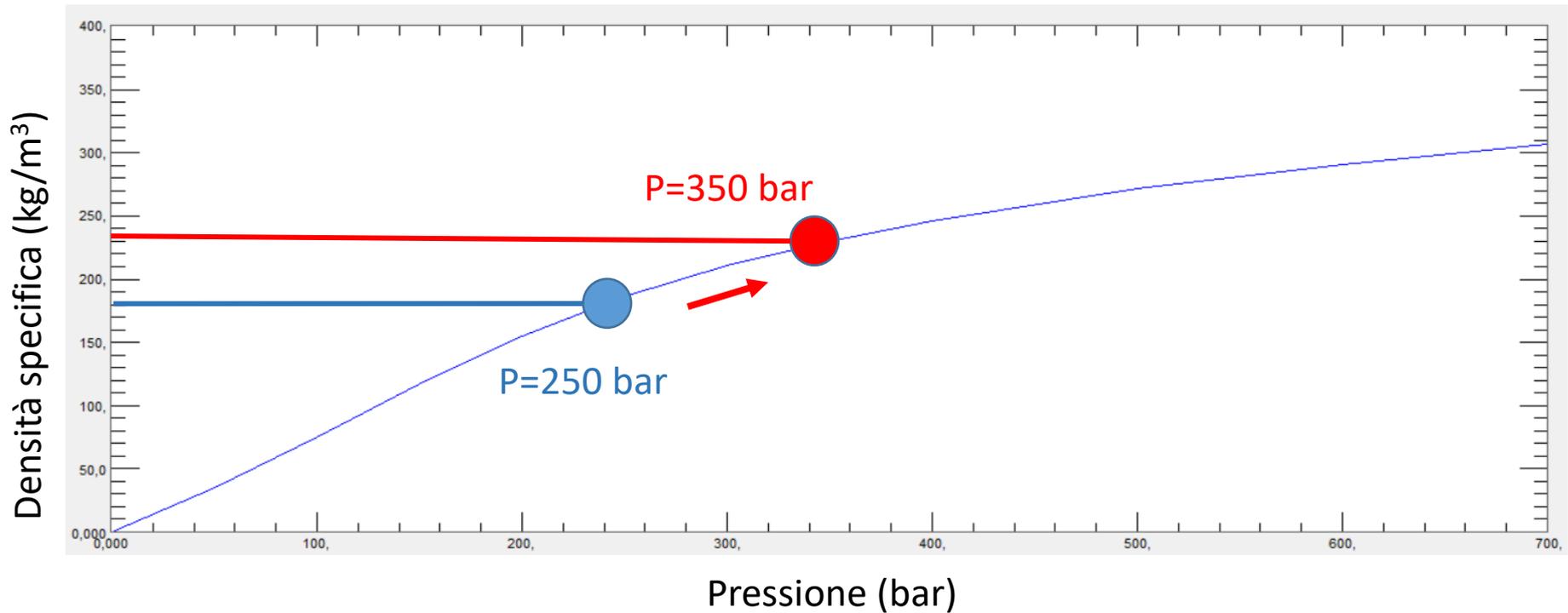
(Liquified Natural Gas)



CNG

GAS NATURALE COMPRESSO

Densità in funzione della pressione per gas metano a $T = 300\text{ K}$



TANK PER GAS NATURALE COMPRESSO

Type 1 CNG Tank



- Costruito interamente in acciaio;
- Molto pesante.

Type 2 CNG Tank



- Struttura in acciaio;
- Materiale composito arrotolato;
- 25 % più leggero di Type 1.

Type 3 CNG Tank



- Liner di alluminio e mantello di materiale composito;
- Risparmio significativo di peso.

Type 4 CNG Tank

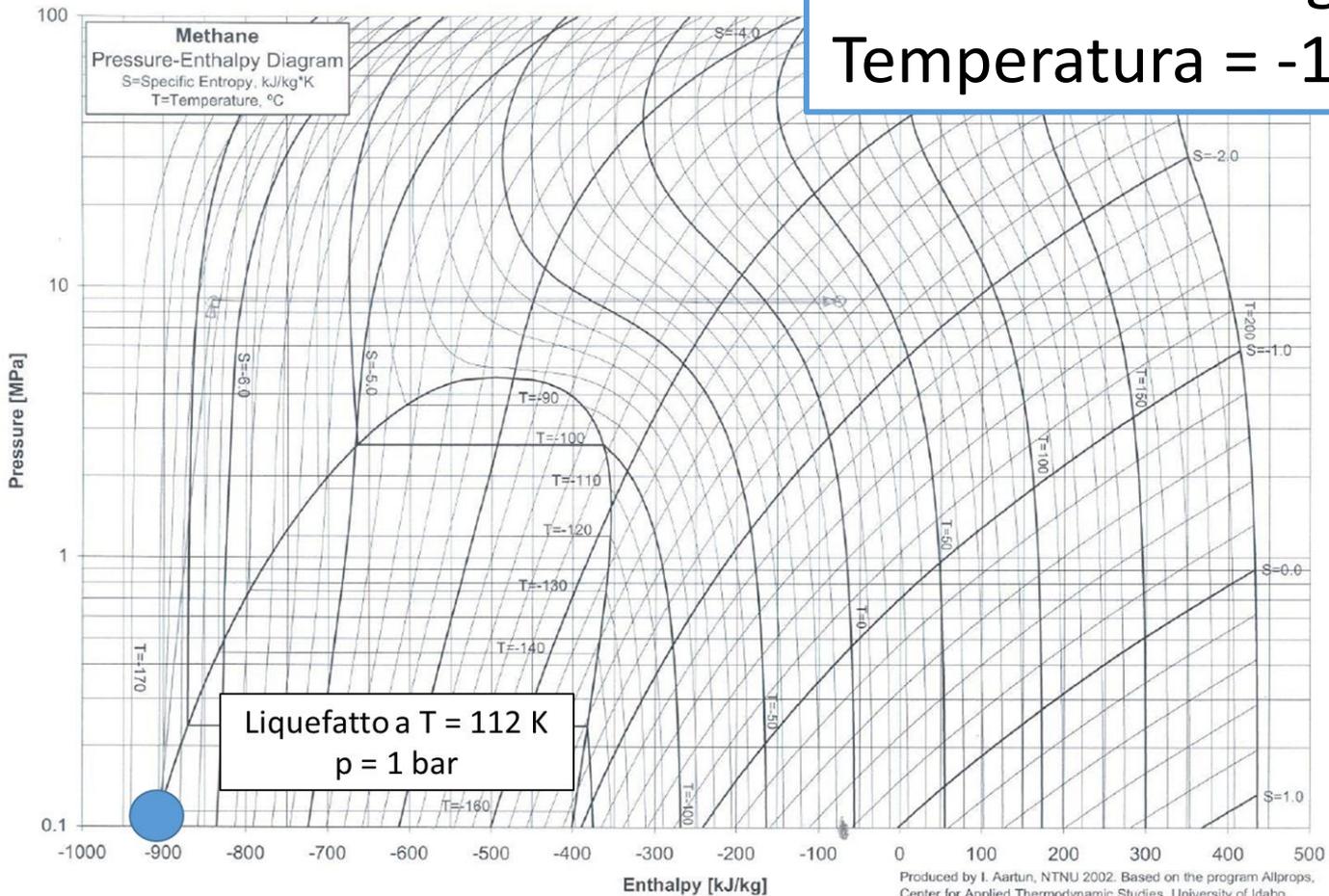


- Liner di polietilene e mantello di materiale composito;
- Risparmio significativo di peso.

LNG

GAS NATURALE LIQUEFATTO

Densità = 400 kg/m³
Temperatura = -162 °C



COMPOSIZIONE GAS NATURALE LIQUEFATTO

Terminal	Methane	Ethane	Propane	Butane	Nitrogen
Abu Dhabi	87.07	11.41	1.27	0.14	0.11
Alaska	99.80	0.10	N.A.	N.A.	N.A.
Algeria	91.40	7.87	0.44	0.00	0.28
Australia	87.82	8.30	2.98	0.88	0.01
Brunei	89.40	6.30	2.80	1.30	0.00
Indonesia	90.60	6.00	2.48	0.82	0.09
Malaysia	91.15	4.28	2.87	1.36	0.32
Oman	87.66	9.72	2.04	0.69	0.00
Qatar	89.87	6.65	2.30	0.98	0.19
Trinidad	92.26	6.39	0.91	0.43	0.00
Nigeria	91.60	4.60	2.40	1.30	0.10

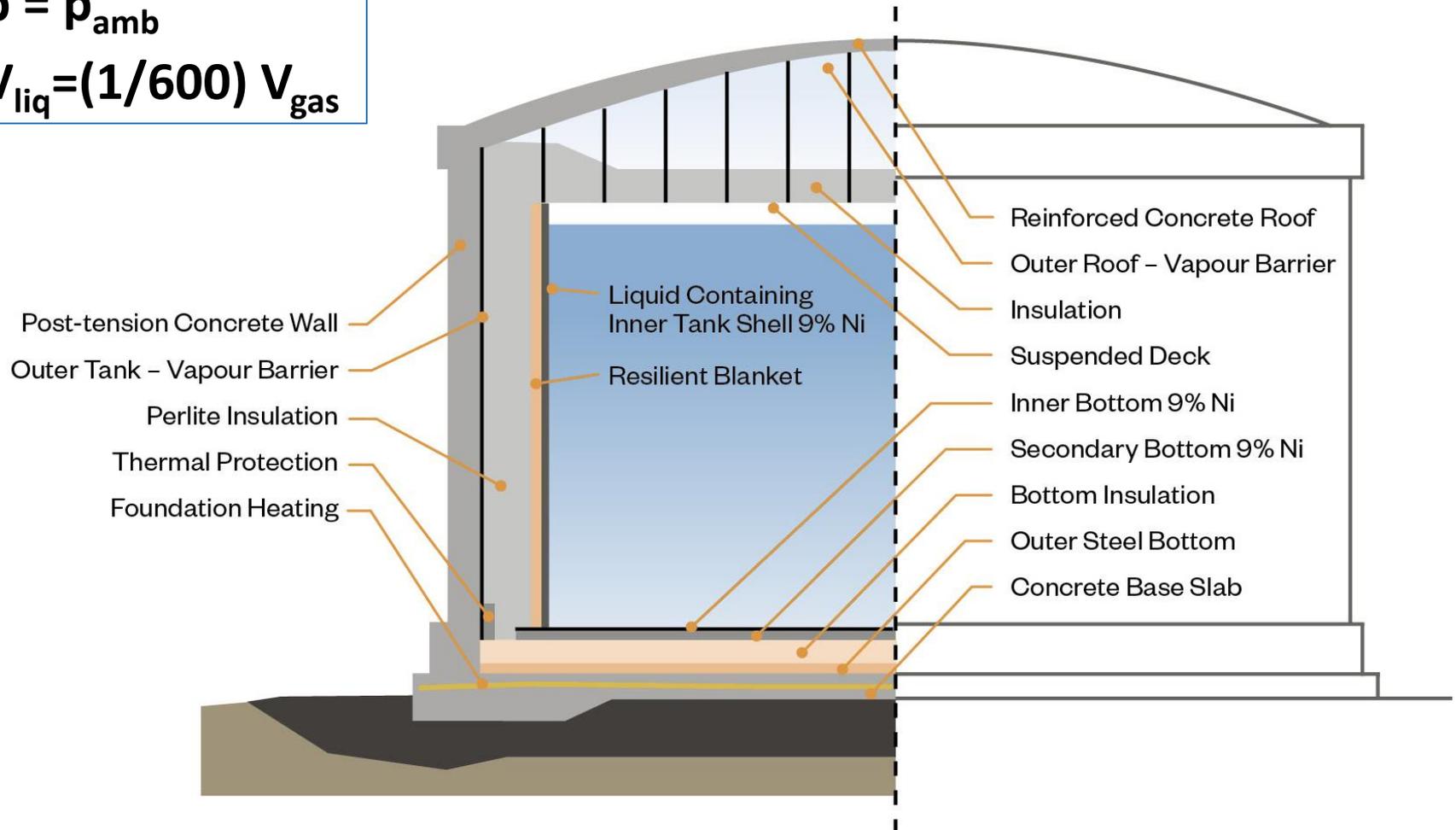
Kanbur BB, Xiang L, Dubey S, Choo FH, Duan F. Cold utilization systems of LNG: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;79:1171–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.161>.

GAS NATURALE LIQUEFATTO

$$T = 112 \text{ K}$$

$$p = p_{\text{amb}}$$

$$V_{\text{liq}} = (1/600) V_{\text{gas}}$$



GAS NATURALE LIQUEFATTO

Primary barrier:

Self supporting IMO independent tank type A.

Material Stainless steel of 9% nickel steel.

Secondary barrier:

Liquid tight thermal insulation.

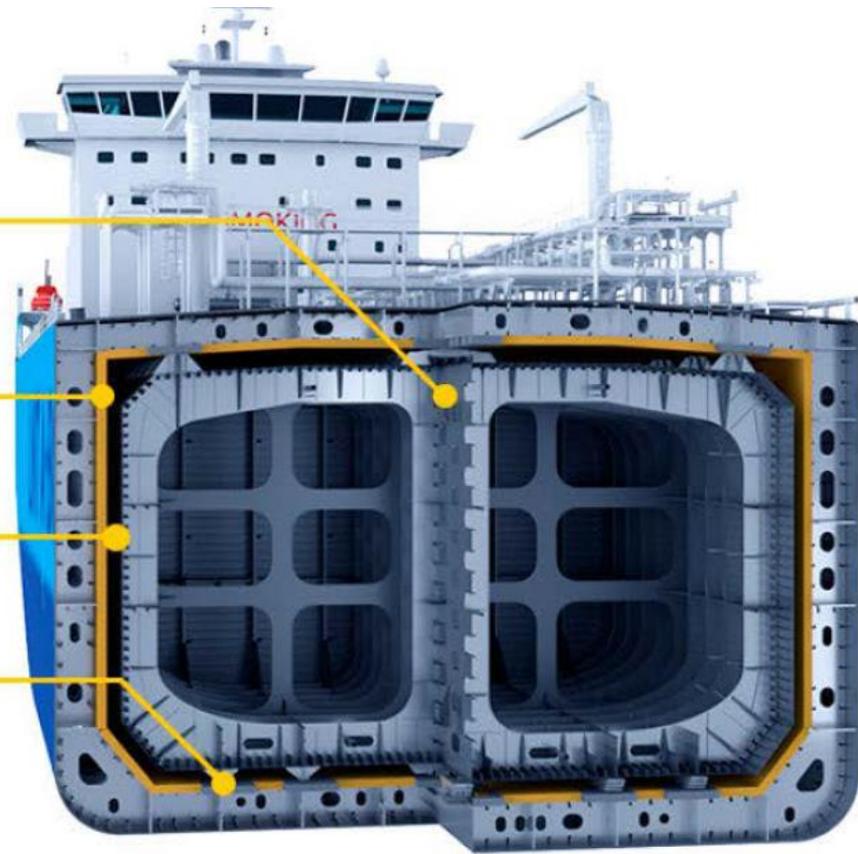
Based on polyurethane foam panels.

Interbarrier space:

Accessible space between tank and insulation.

Cargo tank support:

conventional cargo tank support system.



LNT-Marine – <https://Intmarine.com/>

Fenomeni da controllare:

- **Boil-off gas:** gas prodotto dall'evaporazione del liquido criogenico.
- **Stratificazione:** disposizione naturale delle componenti di LNG in base a densità specifica.
- **Roll-over:** fenomeno di mescolamento brusco degli strati a differente densità. Esso provoca aumento del tasso di evaporazione e conseguente aumento della pressione.

GAS NATURALE LIQUEFATTO

Tecniche per ridurre il boil-off:

1. Mescolamento meccanico del LNG in modo da evitare fenomeni di stratificazione.
2. Adeguato isolamento dei serbatoi per ridurre al minimo lo scambio termico con esterno.
3. Utilizzo di ugelli che nebulizzano una parte di LNG nella parte superiore del serbatoio in modo da raffreddarne il contenuto.
4. Rimozione di parte del boil-off gas in modo da evitare l'aumento di pressione che favorirebbe ulteriormente il fenomeno di evaporazione.

TASSO DI EVAPORAZIONE = 0,1 % del volume al giorno

Boil-off gas può essere:

- Utilizzato direttamente per alimentare **unità di conversione energetica** (es. motori, boiler, ecc.);
- **Re-liquefatto.**

La scelta impiantistica da adottare dipende essenzialmente dalla quantità di boil-off gas prodotto durante il trasporto

GAS NATURALE LIQUEFATTO



Stirling cryogenics

<https://www.stirlingcryogenics.eu/>

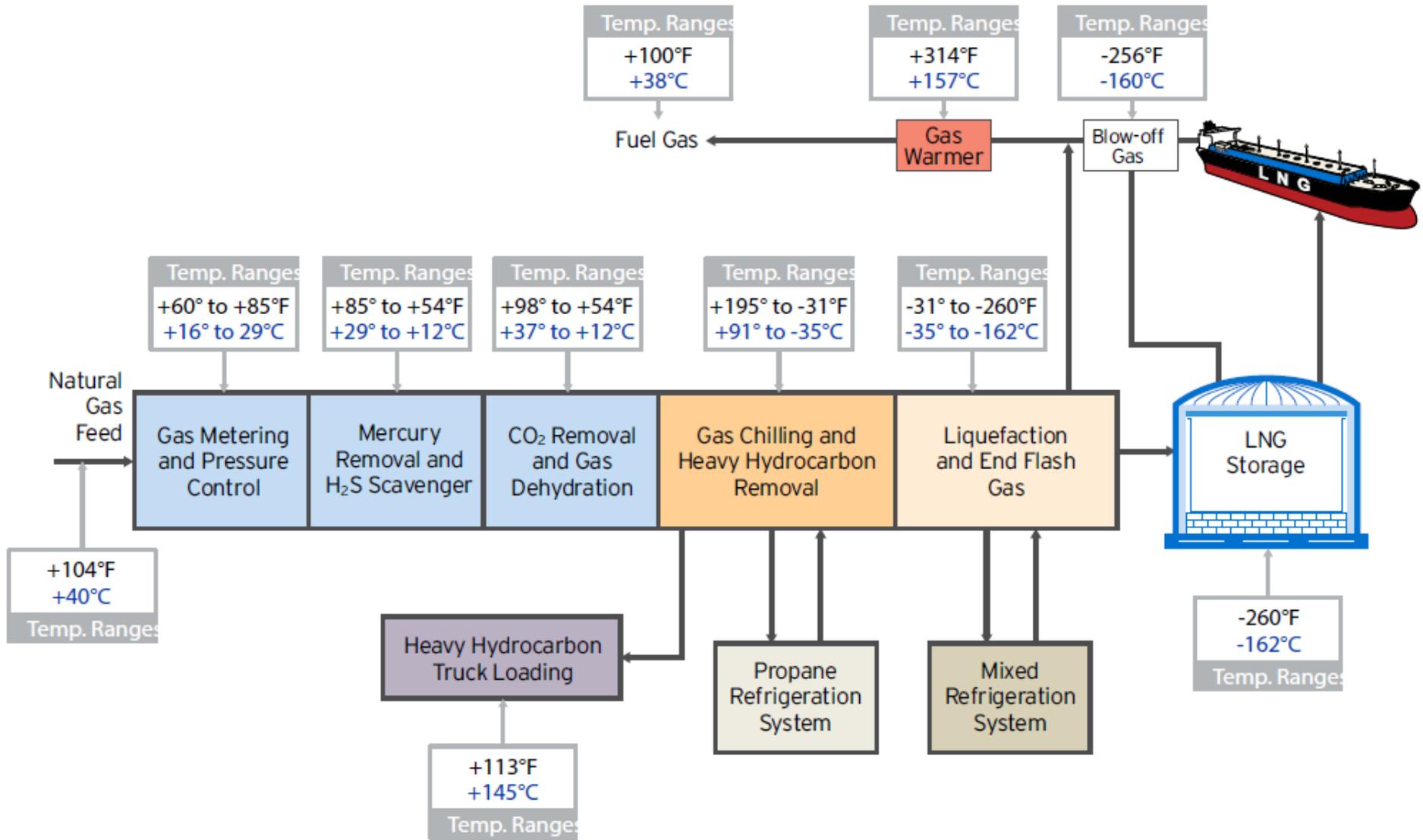


Cryostar

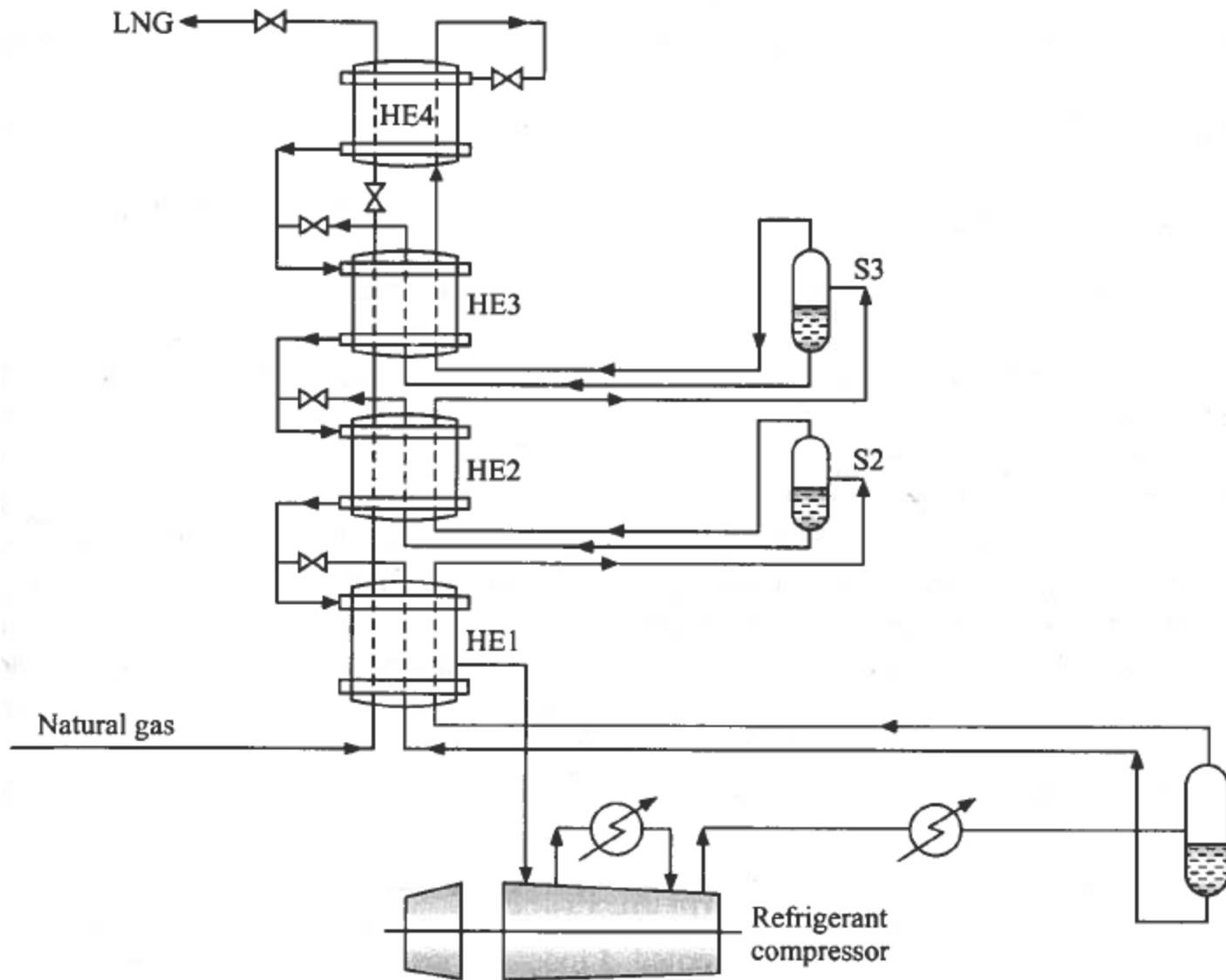
<https://cryostar.com/>

PROCESSO DI LIQUEFAZIONE

PROCESSO DI LIQUEFAZIONE DEL GAS NATURALE



MULTICOMPONENT REFRIGERANT (MCR) PROCESS



En. richiesta $< 250 \text{ kWh/t}_{\text{LNG}}$

$3,5 \text{ mtpa} < \text{Cap. liq.} < 8 \text{ mtpa}$



Cameron LNG - <https://cameronlng.com/>

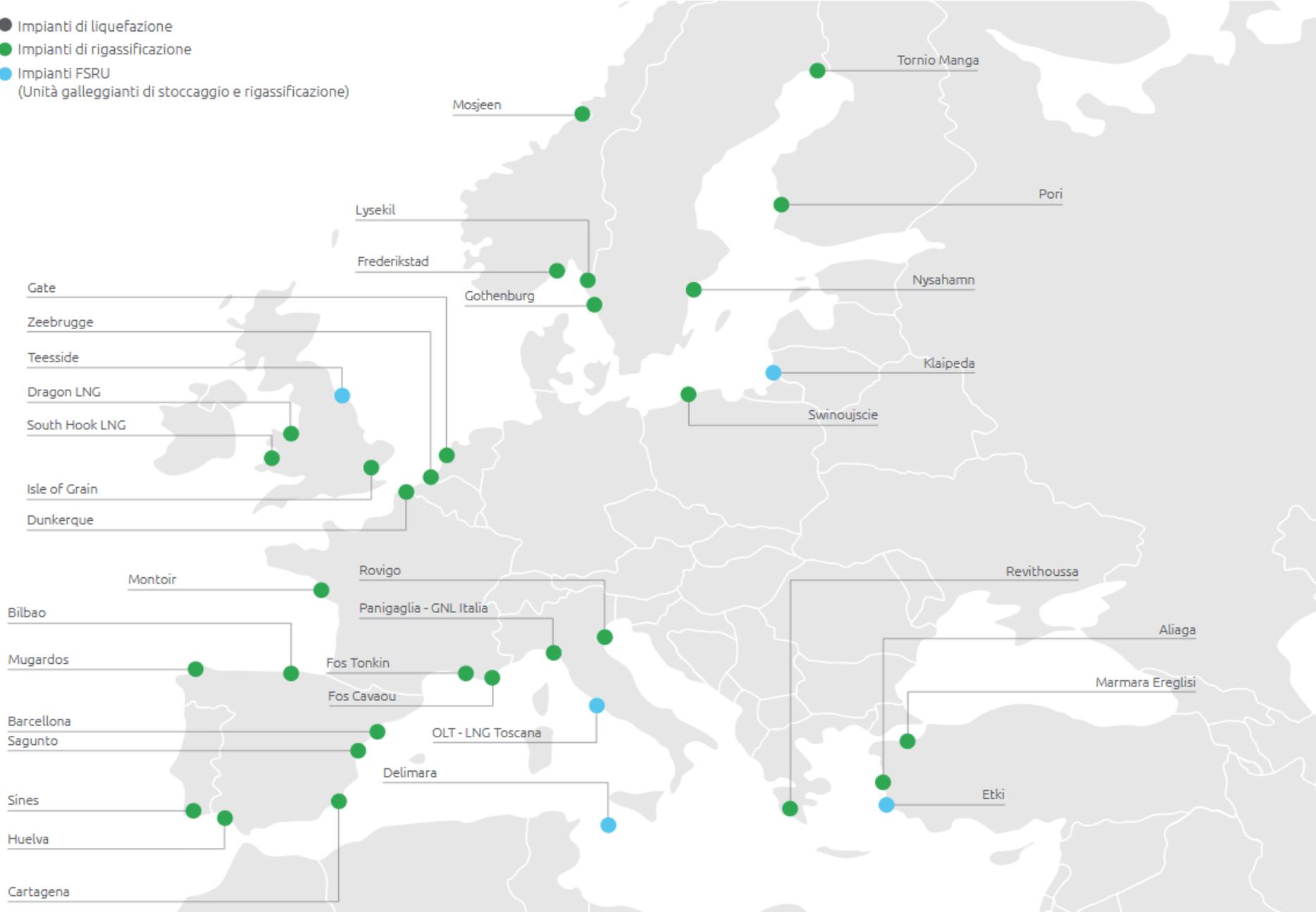
PROCESSO DI LIQUEFAZIONE DEL GAS NATURALE

I processi con ciclo utilizzante **refrigerante misto e pre-raffreddamento a propano** rappresentano **più del 90 %** degli impianti di liquefazione di gas naturale.

Perdita di efficienza nella linea di produzione LNG	
Fasi della produzione	Perdita percentuale rispetto a gas naturale in ingresso
Liquefazione gas	Dall' 8 al 10 %
Shipping	Dal 0,15 al 0,3 %
Rigassificazione	Dal 2 al 2,5 %

PROCESSO DI RIGASSIFICAZIONE

- Impianti di liquefazione
- Impianti di rigassificazione
- Impianti FSRU
(Unità galleggianti di stoccaggio e rigassificazione)

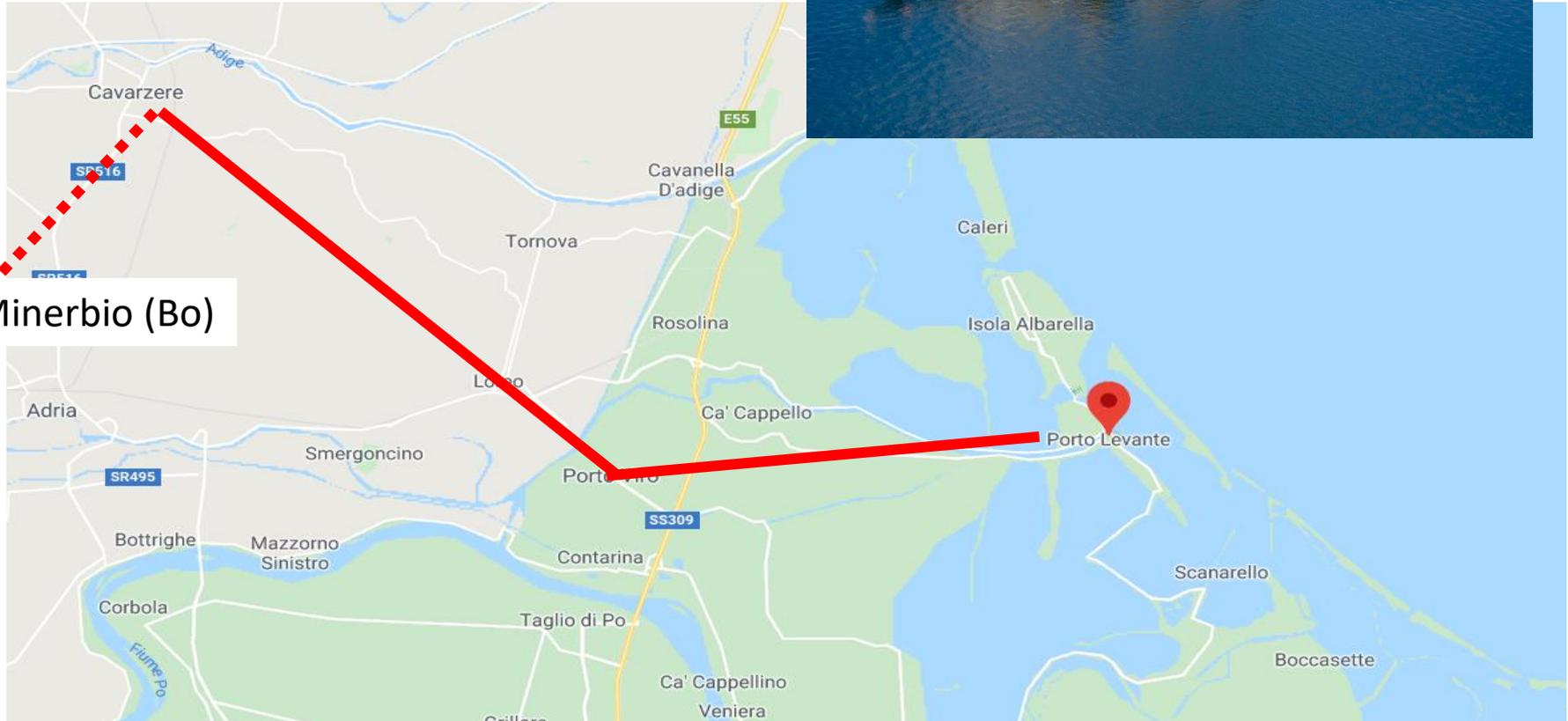


Nota: FRSU – Floating Storage Regasification Units

GAS NATURALE LIQUEFATTO

Terminale GNL Adriatico

$C_{\max} = 8$ miliardi di Nm³/anno



GAS NATURALE LIQUEFATTO

Rigassificatore di Panigaglia (La Spezia)

$C_{\max} = 4$ miliardi di Nm³/anno



GAS NATURALE LIQUEFATTO

OLT Offshore LNG Toscana

$C_{\max} = 3,75$ miliardi di Nm³/anno



GAS NATURALE LIQUEFATTO

LNG value chain:

https://www.youtube.com/watch?v=uztD_gAfNzA&ab_channel=altabnet
[video](#)

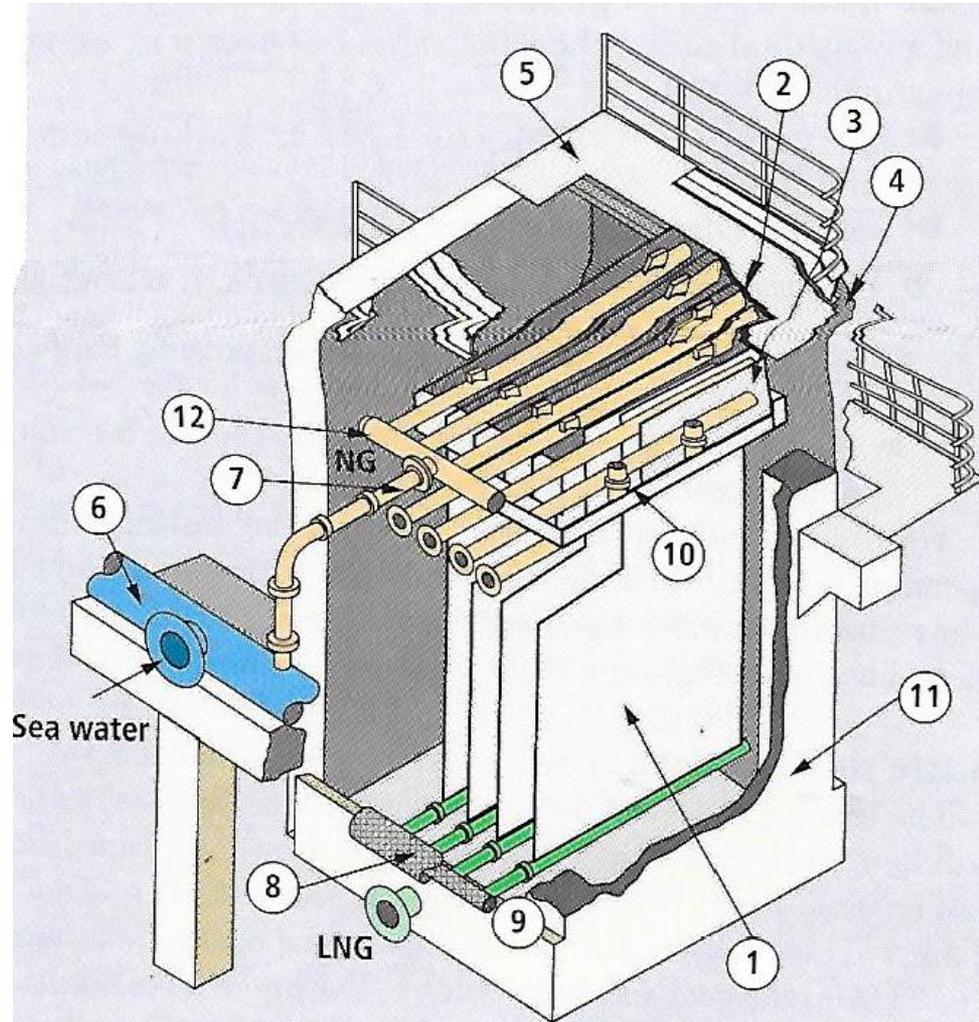
LNG regasification via FSRU:

[https://www.youtube.com/watch?v=xnClpULVlqw&ab_channel=H%C3%](https://www.youtube.com/watch?v=xnClpULVlqw&ab_channel=H%C3%B6eghLNG)
[B6eghLNG](#)

VAPORIZZATORE AD ARIA

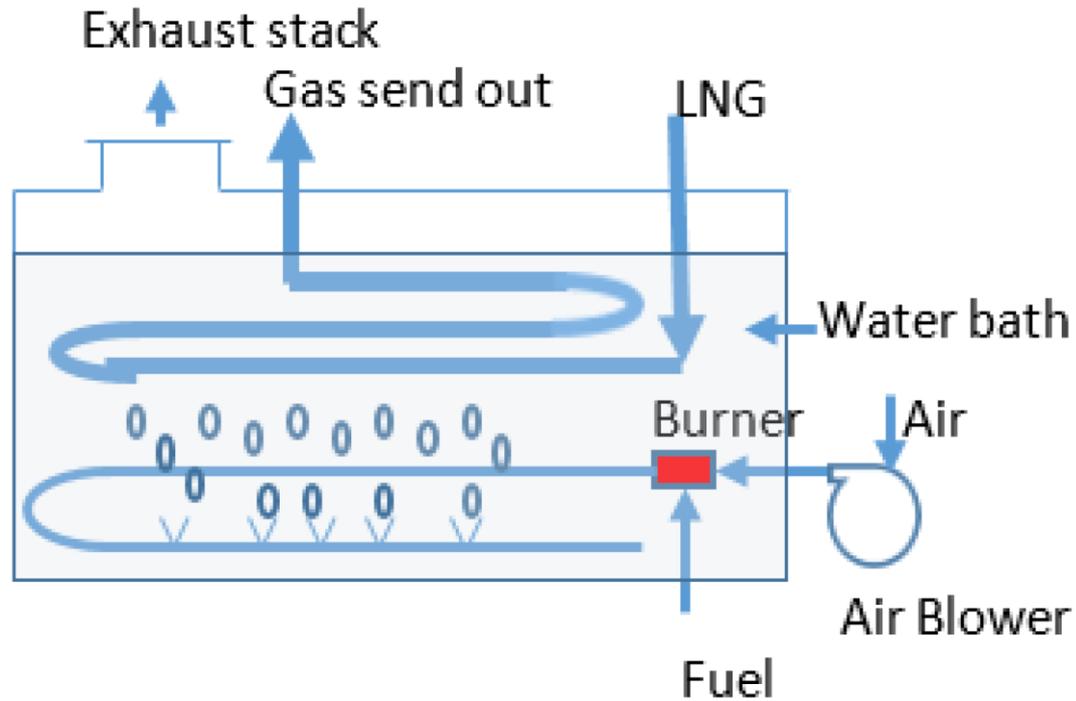


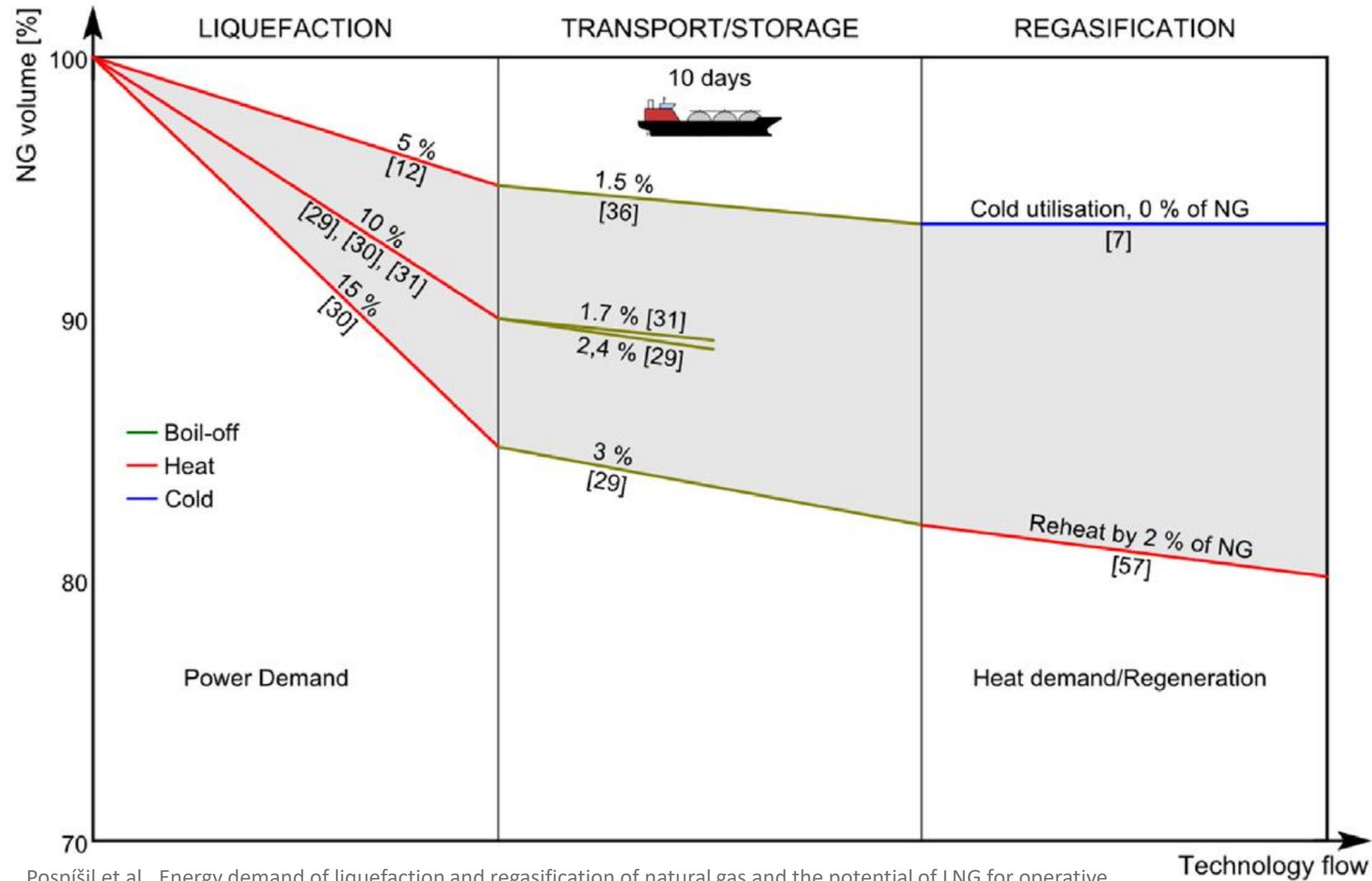
VAPORIZZATORE A OPEN-RACK



1. Heat transfer tubes;
2. Double-face trickling through;
3. Single-face trickling through;
4. Wind shield;
5. Support structure;
6. Sea water inlet manifold;
7. Sea water header;
8. Insulation;
9. LNG inlet manifold;
10. Sea water header;
11. Concrete foundation;
12. LNG outlet manifold;

VAPORIZZATORE A COMBUSTIONE SOMMERSA





Pospíšil et al., Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019

Grazie per l'attenzione



Davide Pivetta – davide.pivetta@phd.units.it