



TEMA 3: COMBUSTIBLES GASEOSOS

MATERIALES DE ESTUDIO

Aitziber Iriondo Hernández
Blanca M^a Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

COMBUSTIBLES GASEOSOS

3.1. Caracterización de combustibles gaseosos

3.1.1. Clasificación. Familias de gases

3.1.2. Procesos de formación de gas natural

3.1.3. Propiedades y especificaciones

3.2. Transporte de combustibles gaseosos

3.2.1. Tipos de transporte

3.2.2. Redes de gasoductos

3.3. Almacenamiento de combustibles gaseosos

3.3.1. Tipos de almacenamiento

3.3.2. Almacenamiento aéreo

3.3.3. Plantas de regasificación

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

CLASIFICACIÓN

Los combustibles gaseosos pueden clasificarse según su **origen** en:

Naturales: gas natural (GN), que se encuentra en depósitos (bolsas) subterráneas junto con el petróleo y el carbón

Manufacturados: obtenidos mediante distintos procesos industriales → gas de alto horno, gas de gasógeno, gas de coque, gases licuados del petróleo (GLP)

* **Bio gases:** combustible obtenido por digestión anaerobia de residuos orgánicos

Según su **intercambiabilidad** pueden clasificarse en **familias: 1^a, 2^a y 3^a familia de gases** (ver tabla 3.1)

Índice de Wobbe superior = $W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d}}$ → parámetro de intercambiabilidad

PCS: poder calorífico superior del gas

d: densidad relativa del combustible respecto del aire

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

FAMILIAS DE GASES

Tabla 3.1. Familias de gases ([Norma UNE-EN 437:2003+A1:2009](#): Gases de ensayo. Presiones de ensayo. Categorías de los aparatos

Familia	Tipos de gases	W_s (MJ/m ³ N)	PCS aprox. (kcal/m ³ N)
1 ^a	Gases manufacturados: – Obtenidos de la gasificación de naftas o carbones – Mezclas diluidas de gases de la 2 ^a o 3 ^a familia en aire. Por ejemplo, aire propanado (20 %), aire metanado (40 %)	22,4–24,8	≈ 4500
2 ^a	Gases naturales : – Gases naturales y gas natural sintético – Mezclas de propano/butano y aire. Por ejemplo, aire propanado (40 %)	39,1–54,7	≈ 9000
3 ^a	Gases licuados del petróleo (GLP): – Propano y butano	72,9–87,3	≈ 25000

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

Los combustibles gaseosos tienen una serie de **ventajas** frente a los combustibles sólidos y líquidos:

- **Manipulación más sencilla**, ya que llegan al usuario (en bombonas o mediante gasoducto) preparados para la combustión
- **Combustión más limpia**, al eliminar impurezas (H_2S , partículas, etc.) antes de la combustión
- **Mayor relación atómica Hidrógeno/Carbono**: menores emisiones de CO_2
 - Gas natural (metano): $H/C = 4/1 = 4$
 - Petróleo (decano): $H/C = 22/10 = 2,2$
 - Carbón (coroneno): $H/C = 12/24 = 0,5$

También presentan algunas **desventajas**: ocupan mayor volumen que un combustible sólido o líquido a presión atmosférica. Por este motivo, suelen almacenarse y transportarse a bajas temperaturas o altas presiones, lo que supone un coste adicional, y adoptar medidas de seguridad para la prevención de accidentes

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROCESOS DE FORMACIÓN DE GAS NATURAL

El gas natural, o más concretamente el metano (CH_4) se forma vía tres procesos naturales; biogénico, termogénico y abiogénico

- ✓ **Proceso biogénico.** Se conoce así al proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica (M.O., procedente de pantanos, vertederos, arrozales, sedimentos orgánicos enterrados en la tierra, etc.) por microorganismos



Biogás: CH_4 (60-70%) + CO_2 + CO + N_2 + O_2 + NH_3 + H_2S

Este proceso se desarrolla en capas superiores de la tierra, pudiendo alcanzar los 2 km de profundidad ($\approx 90^\circ\text{C}$)

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROCESOS DE FORMACIÓN DE GAS NATURAL

✓ **Proceso termogénico.** Se genera en las profundidades de la Tierra, en rocas sedimentarias situadas a profundidades superiores a 2 km bajo temperaturas en torno a 100-500 °C

Estas temperaturas son capaces de romper los enlaces de la materia orgánica sedimentaria y generar CH₄

En este proceso también se generan: etano+propano e hidrocarburos gaseosos más pesados

Los gases formados migran hasta encontrar la trampa adecuada, donde quedan contenidos, formando yacimientos de gas aprovechable

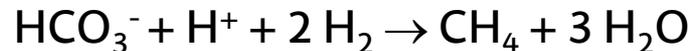
Este tipo de CH₄ también se puede formar a partir de la:

- Descomposición térmica del petróleo situado a grandes profundidades (ver fig. 2.2, [tema 2](#))
- Maduración del carbón cuando se da el proceso de carbogénesis (proceso de formación del carbón a partir de sustancias vegetales) (ver fig. 1.1, [tema 1](#))

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROCESOS DE FORMACIÓN DE GAS NATURAL

✓ **Proceso abiogénico.** A temperaturas superiores a 100 °C, el CH₄ también se puede formar mediante una reacción redox (reducción-oxidación) entre el dióxido de carbono (CO₂) y el agua (H₂O):



Esta reacción también se puede dar a grandes profundidades durante el enfriamiento del magma que contiene materiales ferrosos:



TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades más importantes de los combustibles gaseosos son:

- **Presión** (medida en Pa, bar, mediante manómetro, ver fig. 3.1) y **temperatura** (medida en K, °C) de suministro y utilización.
- **Punto de rocío:** temperatura a la que comienza la condensación, ya sea del vapor de agua o de los hidrocarburos más pesados que contiene el combustible gaseoso en cuestión.
- **Densidad:**
 - **Absoluta:** relación entre la masa y el volumen del gas, medido en unas condiciones determinadas de presión y temperatura ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$)
 - **Relativa:** se mide respecto del aire gas seco, habitualmente en condiciones normales de temperatura y presión (adimensional)



Figura 3.1. Manómetro para la medida de presión de gas. Fotografía publicada en Pixabay bajo licencia CC0 [\[1\]](#)

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES FÍSICAS

- **Compresibilidad:** capacidad de los gases para disminuir su volumen al variar las condiciones de presión y temperatura. Los gases son compresibles, propiedad que hace posible su transporte por gasoducto en forma licuada.

No todos los gases pueden licuarse aunque se apliquen altas presiones. Por encima de la **temperatura crítica (T_c)** no se puede licuar un gas por compresión. Los gases se clasifican, en función de su T_c , en dos grupos, que determinarán su transporte y almacenamiento (tabla 3.2):

- **Baja T_c** (aire, O_2 , N_2 , CH_4 , etc.): pueden comprimirse a cualquier presión ($T > T_c$) sin que se produzca su licuación → transporte y almacenamiento en estado gaseoso
- **Alta T_c** , en general $> T$ ambiente (C_3H_8 , C_4H_{10} , CO_2 , etc.): se licuan al comprimirse → transporte y almacenamiento en estado líquido

Tabla 3.2. Temperatura crítica de gases comerciales (fuente: Sedigas, 2011 [2])

Gas comercial	T_c (°C)
Gas natural	-82,5
Propano	96,8

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES QUÍMICAS

- **Composición:** se indica mediante el análisis de distintos componentes (% vol.). La composición suele medirse en condiciones de referencia (15 °C y 1 atm)

La tabla 3.3 recoge la composición aproximada de algunos gases combustibles:

- **Gases manufacturados:** gas de alto horno, gas de gasógeno, gas ciudad, gas de coquería
- **Gases naturales:** gas natural L y H. El gas natural L, tiene un menor contenido en CH₄ y menor poder calorífico respecto del gas natural H. La composición del gas natural varía según el yacimiento (ver tabla 3.4)
- **Biogás:** gas de digestor y gas de vertedero
- **Gases licuados del petróleo:** propano y butano

La composición del combustibles gaseoso condiciona otras propiedades de relacionadas con la combustión, entre otras, el poder calorífico, calor específico y límites de inflamabilidad

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES QUÍMICAS

Tabla 3.3. Composición (% vol.) de diferentes gases combustibles. Adaptada de González y Calventus, 2006¹ y Engineeringtoolbox [3]²

Gas	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _n H _m	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S
Gas de alto horno ¹	4,1	21,4	--	--	--	--	--	22	52,5	--	--
Gas de gasógeno ¹	12	28	0,5	--	--	--	--	5	54,5	--	--
Gas ciudad ¹	51	18	19	--	--	--	--	4	6	--	--
Gas de coquería ¹	54,5	5,5	25,3	--	--	--	2	2,3	9,6	0,5	--
Gas natural L ¹	--	--	81,8	2,8	0,4	0,2	2,3	0,8	14	--	--
Gas natural H ¹	--	--	93	3	1,3	0,6	--	1	1	--	--
Gas de digestor ²	0,7	--	64	--	--	--	--	30	2,0	--	0,8
Gas de vertedero ²	0,1	0,1	47	--	--	--	--	47	3,7	0,8	<0,1
Propano ²	--	--	--	2,0-2,2	73-97	0,5-0,8	--	--	--	--	--

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES QUÍMICAS

Tabla 3.4. Composición (% vol.) de diferentes gases naturales (adaptada de Sedigas, 2011 [2])

Gas natural	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	≥C ₆ H ₁₄	N ₂	CO ₂	H ₂ S
Argelia (Barcelona)	90,991	7,492	0,952	0,261	0,017	--	0,587	--	0,001
Argelia (Huelva)	89,192	8,200	1,622	0,496	0,030	--	--	--	
Libia	87,365	10,963	0,611	0,056	--	--	0,963	--	
Argelia gasoducto	83,600	7,610	1,980	0,790	0,230	0,120	5,691	--	
Conexión Francia	96,696	2,327	0,192	0,377	0,010	--	0,397	0,001	
Nacional	97,649	0,255	0,068	0,055	0,013	--	1,744	0,216	

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

- **Poder calorífico:** calor desprendido en la combustión ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}$). Se calcula a partir de la composición. La relación entre el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) se ha explicado detalladamente en los temas 1 y 2:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - m_v \cdot \lambda_{\text{cond}}$$

m_v : masa de agua/kg combustible; λ_{cond} : calor de condensación del agua

A partir de la composición del combustible gaseoso:

$$\text{PC} = \sum_{i=1}^n y_i \text{PC}_i$$

y_i : fracción molar del componente i
 PC_i (PCS o PCI): poder calorífico del componente i (tabla 3.5)

Tabla 3.5. Poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI) de diversos gases (25 °C y 1 atm) ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}$) (Pulgar y Olay, 2008)

Gas	PCS	PCI
H ₂	3050	2570
CH ₄	9530	8570
C ₂ H ₆	16860	15390
C ₃ H ₈	24350	22380
C ₄ H ₁₀	32060	29560
CO	3030	3030

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

- **Calor específico:** cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa (o volumen) de un gas para elevar su temperatura 1 °C ($\text{kcal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A volumen constante $\rightarrow c_v$

A presión constante $\rightarrow c_p$, aunque habitualmente toma la nomenclatura "c"

El calor específico depende de la temperatura; de forma genérica esta relación se expresa como:

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

$$c_p = a + bT + CT^2$$

Para un determinado combustible gaseoso el calor específico puede determinarse a partir de la composición (ver tabla 3.6).

$$C_{\text{mezcla gaseosa}} = \sum_{i=1}^n y_i c_i(T)$$

y_i : fracción molar del componente i
 c_i : calor específico del componente i

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

Tabla 3.6. Calores específicos de diversos gases a presión constante ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) entre 25°C y 1400°C (Adaptado de Velasco Hurtado, C. J. [4])

Gas	25 °C	100 °C	500 °C	1000 °C	1400 °C
O ₂	0,313	0,316	0,335	0,354	0,365
N ₂	0,311	0,311	0,320	0,335	0,345
Aire seco	0,311	0,312	0,322	0,339	0,349
CO ₂	0,397	0,413	0,481	0,532	0,558
SO ₂	0,426	0,440	0,501	0,542	--
H ₂ O	0,358	0,361	0,381	0,413	0,436
H ₂	0,301	0,309	0,312	0,318	0,325
CO	0,311	0,312	0,322	0,339	0,349
CH ₄	0,377	0,401	0,522	0,650	--
C ₂ H ₄	0,467	0,507	0,696	0,858	--
C ₂ H ₆	0,564	0,614	0,866	1,096	--

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

- **Temperatura teórica de combustión:** temperatura máxima que se puede alcanzar en la combustión estequiométrica de un determinado combustible gaseoso, suponiendo un recinto adiabático (tabla 3.7)
- **Temperatura de inflamación:** temperatura a la que la mezcla estequiométrica combustible gaseoso/aire arde cuando se pone en contacto con una llama auxiliar (ver tabla 3.7)
- **Temperatura de ignición:** temperatura a la que la mezcla estequiométrica combustible gaseoso /aire arde de manera espontánea sin necesidad de una llama auxiliar

Tabla 3.7. Temperaturas teórica y de inflamación de algunos combustibles gaseosos (adaptado de Sedigas, 2011 [2])

Gas	Temperatura teórica (°C)	Temperatura de inflamación (°C)
Gas natural	1950	510
Propano comercial	1980	468
Butano comercial	2005	410

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

No todas las mezclas de gas combustible y aire son adecuadas para arder. Para iniciar y propagar la combustión es preciso alcanzar la **temperatura de inflamación**, a la que se garantiza el inicio y la continuidad de la combustión

- **Límites de inflamabilidad:** relaciones volumétricas (expresadas en porcentaje en volumen) combustible/aire a las que, a presión y temperatura ambiente, la mezcla es inflamable.
 - **Límite de inflamabilidad inferior (LII):** proporción mínima de combustible
 - **Límite de inflamabilidad superior (LIS):** proporción máxima de combustible

$LII < \text{Proporción estequiométrica (siempre estable)} < LIS$ (fig. 3.2)

Si la proporción combustible/aire no es adecuada, la temperatura de la llama baja, y si no se alcanza la $T_{\text{ignición}}$ y la llama se apaga:

Combustible/aire $< LII$: hay que calentar gran cantidad de aire

Combustible/aire $> LIS$: la combustión no es completa, no hay suficiente aire

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

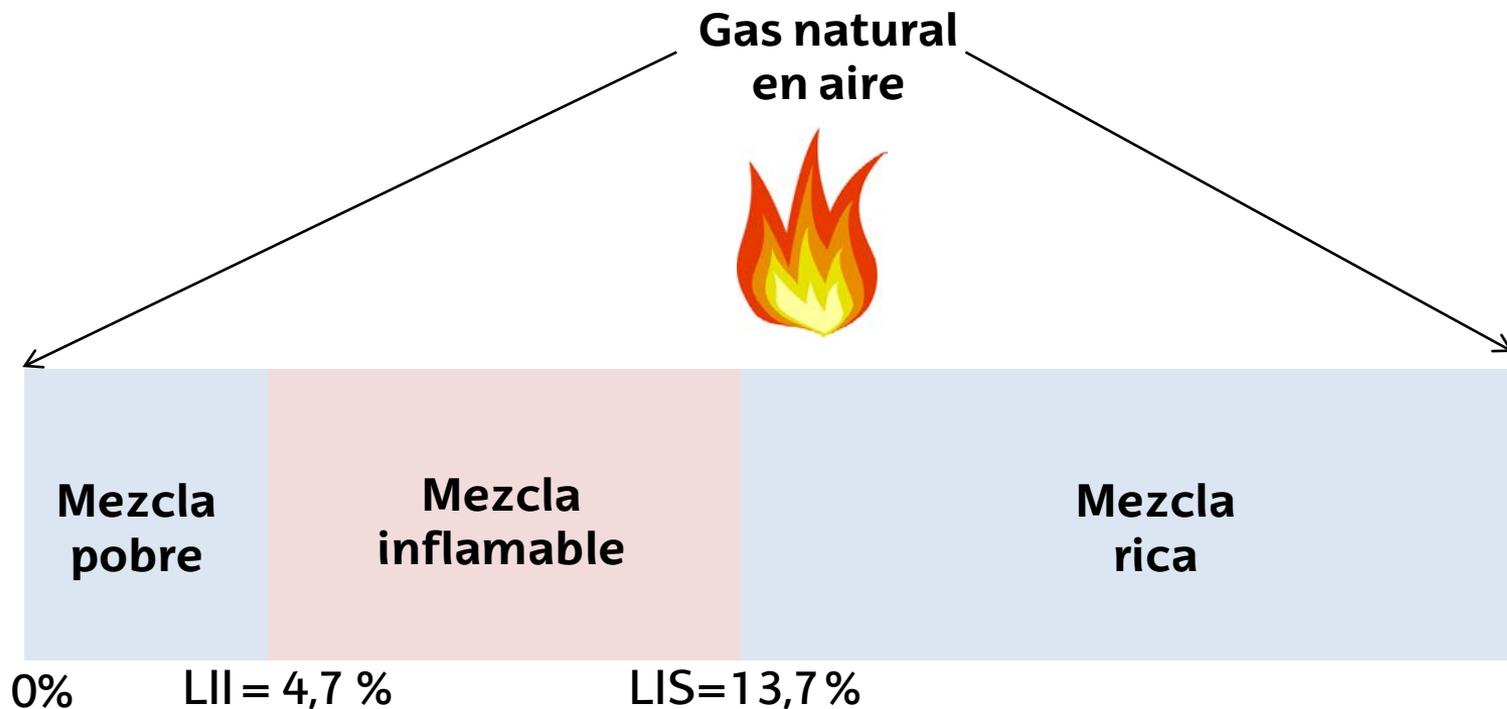


Figura 3.2. Esquema de inflamabilidad del gas natural (límites de inflamabilidad inferior y superior). Elaboración propia a partir de datos de Callejón (2009) y vector publicado en Pixabay [\[5\]](#)

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

Los límites de inflamabilidad (LI) pueden calcularse a partir de su composición, mediante la fórmula **Le Châtelier – Coward**:

$$LI = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{\%V_i}{LI_i}}$$

$\%V_i$ = % volumen del gas i

LI_i = límite de inflamabilidad (inferior o superior del gas i)

→ se calculan en el laboratorio en condiciones controladas (ver tabla 3.8)

Tabla 3.8. Límites de inflamabilidad inferior y superior (% combustible en la mezcla combustible + aire) de distintos gases (adaptado de Callejón, 2009).

También se indica el porcentaje de la mezcla estequiométrica

Gas	LII (%)	LIS (%)	Estequiométrica (%)
H ₂	4,1	72,2	29,58
CH ₄	5,3	14	9,50
C ₂ H ₆	3,2	12,5	5,66
C ₃ H ₈	2,37	9,5	4,03
C ₄ H ₁₀	1,6	8,5	3,13
C ₄ H ₁₀	1,9	8,5	3,13
CO	12,9	74	29,58
C ₂ H ₄	2,75	28,6	6,54

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

▪ **Velocidad de propagación de la llama (v_p):** velocidad con que la llama se desplaza a través de la mezcla aire/gas, que depende de las condiciones de P y T de la mezcla, de su composición volumétrica y de la entrada al quemador

Cuando la mezcla gas combustible/aire se encuentra entre los límites de inflamabilidad, **la combustión se propaga** con una cierta velocidad. El mecanismo fundamental es la conducción del calor de una zona a otra de la masa gaseosa, de manera que se va alcanzando la temperatura de ignición suficiente para que se produzca la combustión

La **llama** es la zona en la que se produce la combustión con emisión de luz, debida a moléculas y átomos en estado incandescente

Para que la combustión sea estable la **velocidad de propagación de la llama (v_p)** debe igualarse con la **velocidad de propagación del frente** formado por la mezcla combustible-aire (v_f):

Combustión estable: $v_f = v_p$

La velocidad de propagación de la llama depende del tipo de combustible

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

▪ Velocidad de propagación de la llama

La máxima **velocidad inicial de propagación de la llama** ($v_{p,max}$) es la velocidad máxima a la que se inicia el proceso de combustión de un determinado combustible gaseoso. Se mide en $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ y la proporción combustible/aire tiene que encontrarse entre los límites de inflamabilidad inferior (LII) y superior (LIS) del combustible, y suele ser próxima a la proporción estequiométrica. En la tabla 3.9 se recogen los límites de inflamabilidad y $v_{p,max}$ de varios combustibles comerciales

Tabla 3.9. Límites de inflamabilidad inferior (LII) y superior (LIS) y velocidad $v_{p,max}$ para algunos combustibles gaseosos (adaptado de Sedigas, 2011 [\[2\]](#))

Gas	LII (%)	LIS (%)	$v_{p,max}$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
Propano comercial	2,4	9,5	40
Butano comercial	1,8	8,4	40
Gas natural	4,7	13,7	35
Gas ciudad	5,8	45,6	70

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

- **Intercambiabilidad:** posibilidad de sustituir un combustible gaseoso por otro en un mismo quemador, conservando las condiciones óptimas de funcionamiento. Dos combustibles gaseosos son intercambiables cuando pueden utilizarse indistintamente en una misma red o instalación sin modificación en las mismas condiciones de caudal y presión, sin necesidad de realizar ningún reglaje ni alteración en el sistema. Se mantienen:
 - La **potencia calorífica**
 - La **combustión higiénica** (% CO < 1000 ppm) sin que se produzcan hollines
 - La **estabilidad de la llama**, sin que se produzca (fig. 3.3):
 - ✓ **Desprendimiento de llama:** $v_f > v_p$ (velocidad del frente combustible/aire > velocidad de propagación de la llama). La llama se aleja progresivamente de la boquilla del quemador, hasta extinguirse por **soplado**
 - ✓ **Retroceso de llama:** $v_f < v_p$. La llama retrocede progresivamente hacia la boquilla del quemador, hasta extinguirse por **calado**

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

Existen diferentes criterios para definir la intercambiabilidad, siendo el de Delbourg el más utilizado a día de hoy, que emplea dos parámetros:

- **Índice de Wobbe (W):** relación entre el poder calorífico del gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa

Índice de Wobbe superior:

$$W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d}}$$

Índice de Wobbe inferior:

$$W_i = \frac{PCI}{\sqrt{d}}$$

- **Potencial de combustión (C):** medida indirecta (proporcional) de la velocidad de propagación de la llama producida en la combustión del gas, representando por tanto su tendencia al soplado o calado

$$C = \frac{\sum a_m v_m}{\sqrt{d}}$$

C: potencial de combustión

v_m : % volumétrico de cada componente del gas

a_m : constante que depende de cada gas (ver tabla 3.10)

d: densidad relativa del gas con respecto al aire

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

El criterio de Delbourg no tiene en cuenta el **fenómeno de puntas amarillas**, (fig. 3.3) que se produce por cracking de partículas carbonosas incandescentes en los extremos de la llama.



Figura 3.3. Puntas amarillas en quemador de gas natural.
Fotografía publicada en pxhere bajo licencia CC0 [\[5\]](#)

Cuanto mayor es el valor de C , más corta es la llama, por lo que aumenta la posibilidad de que se produzca retroceso de llama. Cuanto menor es el valor de C más larga es la llama, aumentando la probabilidad de que se produzca desprendimiento de llama (fig. 3.4).

Tabla 3.10. Valores de la constante a_m y densidad relativa para gases usuales
(Pulgar y Olay, 2008)

Gas	a_m (máx)	d	Gas	a_m (máx)	d
H ₂	1,00	0,007	C ₂ H ₆	0,75	1,046
CO	0,70	0,967	C ₃ H ₈	0,95	1,547
CH ₄	0,30	0,554	C ₄ H ₁₀	1,00	2,071

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA COMBUSTIÓN

La figura 3.4 recoge un diagrama de intercambiabilidad para una determinada familia de gases (1ª o 2ª, ya que los combustibles gaseosos de la 3ª familia de gases no suelen intercambiarse)

Dos gases serán intercambiables si tras calcular sus puntos (C, W) se encuentra en la zona de **funcionamiento correcto**, de manera que no se producen ni retroceso ni desprendimiento de llama y la combustión es **higiénica**.

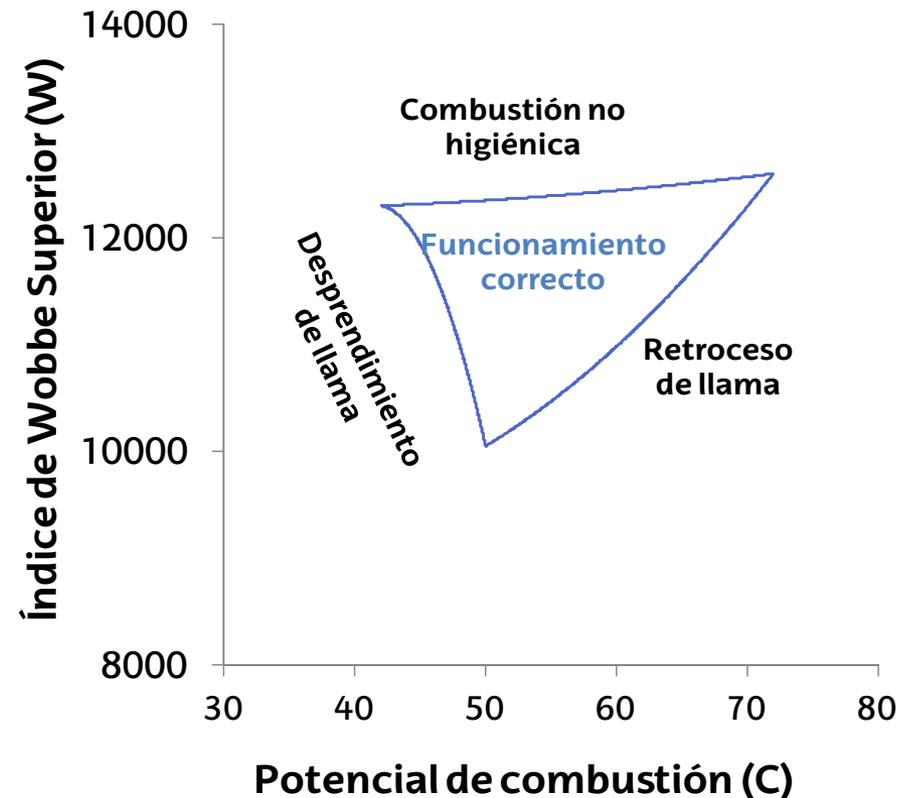


Figura 3.4. Diagrama de intercambiabilidad. Figura propia (adaptada de Sedigas, 2011 [2])

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

El **gas natural** introducido en los puntos de entrada del Sistema Gasista Español deberá cumplir las especificaciones de la *Resolución de 22 de septiembre de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 "medición" de las normas de gestión técnica del sistema gasista* (tabla 3.11)

Las especificaciones de los **gases licuados del petróleo** (propano comercial, tabla 3.12 y butano comercial, tabla 3.13) vienen dadas mediante el *Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, por el que se determinan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo y se regula el uso de determinados biocarburantes*.

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES GASEOSOS. GAS NATURAL

Tabla 3.11. Especificaciones del gas introducido en el Sistema Gasista [\[6\]](#)

Propiedad*	Unidad	Mínimo	Máximo
Índice de Wobbe	kWh/m ³	13,403	16,058
PCS	kWh/m ³	10,26	13,26
d	m ³ /m ³	0,555	0,700
S Total	mg/m ³	-	50
H ₂ S + COS (como S)	mg/m ³	-	15
RSH (como S)	mg/m ³	-	17
O ₂	mol%	-	[0,01]
CO ₂	mol%	-	2,5
H ₂ O (Punto de rocío)	°C a 70 bar (a)	-	+2
HC (Punto de rocío)	°C a 1-70 bar (a)	-	+5
Polvo / Partículas	-	Técnicamente Puro	

*Condiciones de referencia: [0 °C; V (0 °C: 1,01325 bar)]

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES GASEOSOS. PROPANO

Tabla 3.12. Especificaciones del gas propano comercial [7]

Características		Límites	
		Mínimo	Máximo
Densidad (15 °C)		0,502 kg/L	0,535 kg/L
Humedad		Exento	
Contenido de azufre		–	50 mg·kg ⁻¹
Corrosión		–	1 b (según escala)
Presión de vapor (37,8 °C)		10 kg/cm ²	16 kg/cm ²
Residuo volátil (evaporación del 95 % en vol.)		–	-31 °C
H ₂ S		Negativo	
PCI		10800 kcal/kg	
PCS		11900 kcal/kg	
Composición (% vol)	Hidrocarburos C ₂	–	2,5
	Hidrocarburos C ₃	80	–
	Hidrocarburos C ₄	–	20
	Hidrocarburos C ₅	–	1,5
	Olefinas totales.	–	35
	Diolfelinas + acetilenos.	<1.000 ppm	
Olor		Característico	

TEMA 3 CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESPECIFICACIONES DE COMBUSTIBLES GASEOSOS. BUTANO

Tabla 3.13. Especificaciones del gas butano comercial [7]

Características		Límites	
		Mínimo	Máximo
Densidad (15 °C)		0,560 kg/L	–
Agua separada		ausencia	
Contenido de azufre		–	50 mg·kg ⁻¹
Corrosión		–	1 b (según escala)
Presión de vapor (50 °C)		10 kg/cm ²	7,5 kg/cm ²
Doctor test		Negativo	
H ₂ S		Negativo	
Residuo volátil (evaporación del 95% en vol.)		–	+2
PCI		10700 kcal/kg	
PCS		11800 kcal/kg	
Composición (% vol)	Hidrocarburos C ₂	–	2,0
	Hidrocarburos C ₃	–	20
	Hidrocarburos C ₄	80	–
	Hidrocarburos C ₅	–	1,5
	Olefinas totales.	–	20
	Diolfelinas + acetilenos.	<1.000 ppm	
Olor		Característico	

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

TIPOS DE TRANSPORTE

Los tipos de transporte más empleados para combustibles gaseosos son:

1. Por carretera, mediante el empleo de **camiones**
2. Vía marítima, mediante **buques gaseros**, y que en el caso concreto del gas natural (GN) se denominados metaneros
3. Ductos, en este caso denominados comúnmente **gasoductos**
4. Diferentes combinaciones de los anteriores

La elección de uno u otro tipo de transporte se realiza en función de diferentes condiciones, como por ejemplo:

- El tamaño y topografía de las áreas de extracción y mercado
- La cantidad de materia prima/producto a transportar
- El coste (transporte, mantenimiento, ...)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

CAMIONES

Este tipo de transporte, vía terrestre, se emplea cuando no existe la posibilidad del transporte de combustibles gaseosos por ducto. Como ya se ha indicado en el tema 2, existen diferentes tipos de camiones

En el caso de gases licuados, como el GNL (gas natural licuado) y los GLP, los camiones habitualmente empleados son de **fines específicos** y **de tipo cisterna**

- La cisterna está dotada de doble casco para evitar fugas, con aislamiento al vacío o poliuretano
- Cargan y descargan en cargaderos terrestres
- Además, presentan un sistema de señalización especial (fig. 3.5), mediante paneles naranjas, con el fin de identificar la mercancía que transportan, que en este caso particular, es mercancía peligrosa

	GLP	GNL
Nº identificación del peligro	263	223
Nº identificación del producto (nº de Naciones Unidas (UN))	1071	1972

Figura 3.5. Paneles identificativos para los GLP y el GNL. Imagen propia.

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

BUQUES GASEROS

- También denominados buques-tanque (igual que para combustibles líquidos, [Tema2](#)), se emplean para almacenar, transportar y descargar, vía marítima, [productos gaseosos en estado líquido](#), tales como gas natural licuado (GNL) y gases licuados del petróleo (GLP)
 - Para el transporte en estado líquido, los gases deben pasar por un [proceso de licuefacción](#)
- La propulsión o movimiento de estos buques se realiza, habitualmente, aprovechando el [“boil-off”](#) de los tanques de almacenamiento
 - [“Boil-off”](#): parte del gas licuado que vaporiza por entradas de calor
- La capacidad de carga puede variar entre [25000-270000 m³](#)

Cargan y descargan en cargaderos marítimos

En la actualidad, los buques más empleados son los que presentan [tanques independientes](#) y de [membrana](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

BUQUES GASEROS

Tanques independientes, no forman parte de la estructura del casco y son autoportantes (el propio tanque hace las funciones de portador del producto)

Al ser independientes se facilita la distribución de la carga a transportar

Los tanques se construyen habitualmente en aluminio, acero o acero aleado y se aíslan mediante materiales plásticos (PVC, poliuretano o fibra de vidrio)

- **Tipo A**, con forma **prismática-plana**
- **Tipo B**, con forma **esférica** (fig. 3.6 y 3.7), habitualmente denominados Kvaerner Moss o Moss Rosenberg

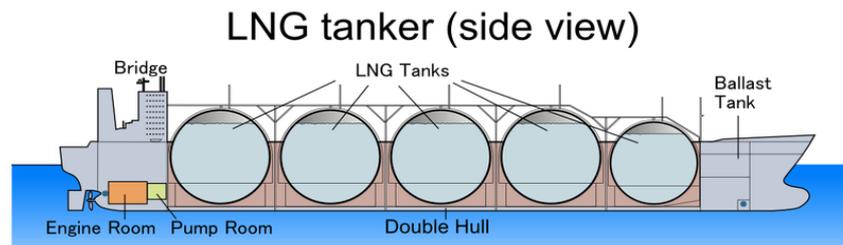


Figura 3.6. Vista lateral de un buque metanero con cisterna esférica. Imagen publicada por Tosaka en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [8]

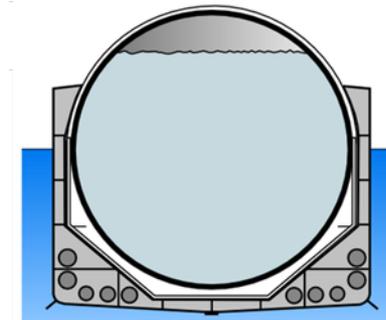


Figura 3.7. Vista frontal de un tanque esférico. Adaptación de la imagen publicada por Tosaka en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [8]

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

BUQUES GASEROS

Tanques de membrana (fig 3.8 y 3.9), no son autoportantes, con cierto grado de integración en la estructura del casco y se distinguen por la estructura prismática de la cubierta. Esta tecnología radica en el uso de **dos barreras**

- La **primera** barrera, de acero aleado (Invar) o inoxidable corrugado, soporta y absorbe las deformaciones causadas por diferentes factores (variación de temperatura, peso de la carga, etc.)
- La **segunda** barrera, de láminas de madera superpuestas (Triplex) o Invar, se emplea para contener el gas licuado en caso de fuga
- Entre el casco y las diferentes barreras se emplea una capa de **aislante** (perlita o poliuretano)

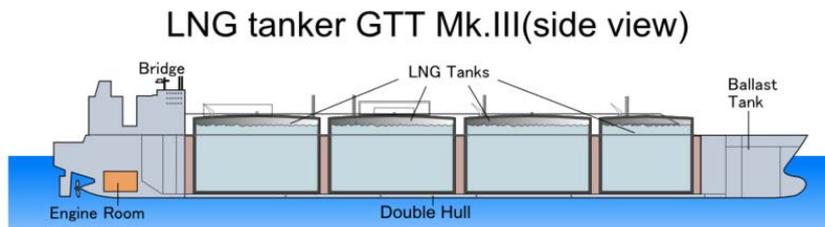


Figura 3.8. Vista lateral de un buque metanero con cisterna de membrana. Imagen publicada por Tosaka en Wikimedia bajo licencia CC BY 3.0 [9]

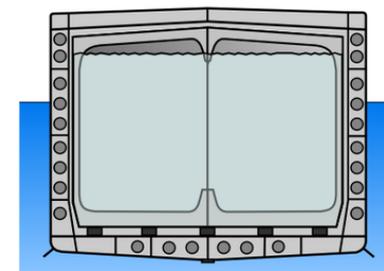


Figura 3.9. Vista frontal de un tanque de membrana. Adaptación de la imagen publicada por Tosaka en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [10]

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

GASODUCTO

Se denomina gasoducto a los ductos e instalaciones anexas que transportan **gases (en fase gas)** a grandes distancias

La estructura de una red de gasoductos es similar a la de los oleoductos, por ser una idea derivada de éstos últimos

- La diferencia principal es que la red de gasoductos constan de **estaciones de compresión** en vez de bombeo

Ventajas:

- Transporte continuo y sin elementos de retorno
- Las presiones empleadas favorecen que el perfil orográfico no influya sobre el transporte
- Económico en cuanto al espacio ocupado
- Seguro y sin influencia del clima
- De fácil mantenimiento y de escaso personal (porque se utilizan aplicaciones de supervisión y adquisición de datos)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

GASODUCTO

Al igual que en el caso de oleoductos y poliductos (ver [Tema 2](#)), este tipo de transporte de combustibles es el más seguro, y en cuanto al coste, es uno de los más económicos

En función de la localización los gasoductos se clasifican en:

- “Onshore” (tierra o enterrado) (fig. 3.10 y 3.11)

Figura 3.10. Señalización de un gasoducto enterrado. Fotografía de Sergio Panei publicada en Wikipedia bajo licencia CC BY 3.0 [\[10\]](#)



Figura 3.11. Parte de un gasoducto aéreo. Fotografía publicada por Presidencia de la República Mexicana en Flickr bajo licencia CC BY 2.0 [\[11\]](#)

- “Offshore” (mar)

*Las ventajas de uno frente a otro se describen en el [tema 2](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

GASODUCTO

Las **características principales** de un gasoducto son las siguientes:

- Principalmente de acero
- La unión se realiza mediante soldadura
- Habitualmente se construye enterrado, y por norma general a 1 m de profundidad
- Las presiones empleadas son elevadas (entre 20 y 100 bar)
- En caso de ser enterrado, éste se protege contra la corrosión, mediante revestimientos (protección pasiva) y protección catódica (protección activa)
 - **Revestimientos externos** (pinturas de poliuretano y alquitrán) para aislar eléctricamente el gasoducto del terreno
 - **Revestimientos internos** (resinas epoxi) para evitar la erosión debida al transporte. También evitan la formación FeS por presencia en el gas de pequeñas cantidades de H₂S
 - **Protección catódica** para disminuir el potencial de la estructura con respecto al suelo

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

GASODUCTO

Al igual que en el caso de oleoductos (ver [Tema 2](#)), el diseño o dimensionamiento de un gasoducto requiere conocer o establecer las siguientes características:

- Capacidad de transporte, que para un gasoducto se define como m^3 (en condiciones normales $0\text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm)/año
- Coeficiente de utilización del ducto (C_u)
- Características físico-químicas de los productos a transportar, que en el caso de un gasoducto son: composición volumétrica mediante la cuál se pueden determinar el peso molecular, peso específico, viscosidad cinemática a la temperatura de transporte y compresibilidad
- Perfil altimétrico del trazado
- Características físico-químicas del terreno
- Temperatura de transporte

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTO

En el dimensionamiento de gasoductos se tienen en cuenta los mismos procedimientos y pasos, esquematizados en la fig. 3.12, que para el dimensionamiento de oleoductos (ver Tema 2). La **diferencia** radica en las **ecuaciones de diseño** a emplear, debido a que el fluido a transportar en un caso es **líquido (oleoducto)** y en otro caso es un **gas (gasoducto)**.

- Características del ducto
- Características físico-químicas del fluido a transportar
- Relación entre las características del ducto y el fluido
- Pérdidas de presión/carga a lo largo del ducto

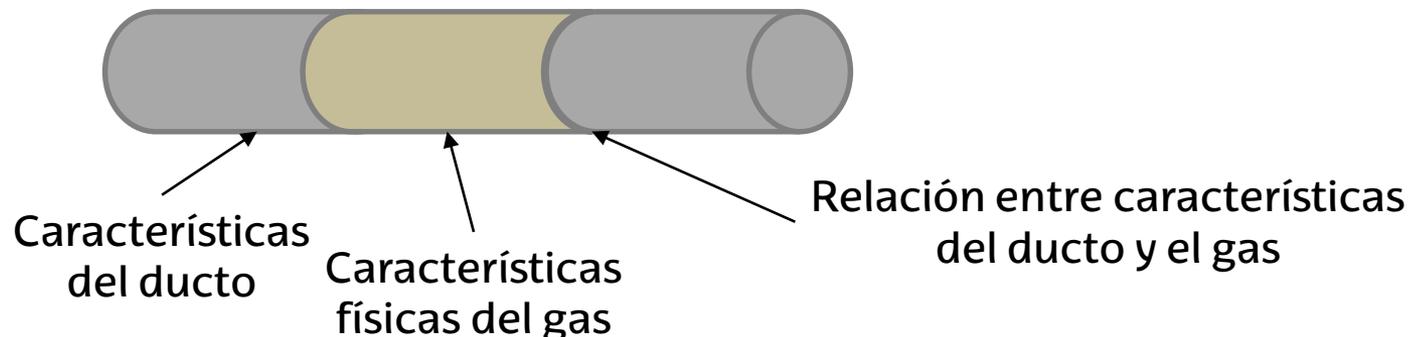


Figura 3.12. Esquema de un ducto que transporta un gas. Imagen propia.

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTO

- Características del ducto, referidas al **diámetro interno (D)** y **espesor (e)** del ducto. Ambos parámetros se calculan mediante las siguientes ecuaciones matemáticas

Cálculo del **diámetro interno (D)** en primera aproximación:

$$D^2 = \frac{353,68 \cdot Q \cdot Z_m}{P_m \cdot v}$$

$$P_m = \frac{2}{3} \left[(P_1 + P_2) - \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right]$$

D = diámetro interno (mm) ; Q = caudal (Nm³/h)
 v = velocidad (comprendida entre 7-10 m/s)
 P_m = presión media (kg/cm²)
 Z_m = factor de compresibilidad a presión media (determinación mediante gráfica)
 P₁ = presión inicial (kg/cm²)
 P₂ = presión final (kg/cm²)

Cálculo del **espesor**:

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot S \cdot F \cdot E \cdot T}$$

e = espesor (mm) ; P = presión máx. de trabajo (kg/cm²)
 D_e = diámetro exterior (mm)
 S = límite elástico del material (kg/cm²)
 F = coeficiente según el tipo de construcción (ANSI B31-8)
 E = factor de junta según procedimiento de fabricación de tubería (ANSI B31-8)
 T = factor de temperatura (ANSI B31-8)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTO

- **Características físicas** del gas. Las características físicas más importantes de los líquidos a transportar por un oleoducto son:
 - **Peso molecular**
 - **Peso específico**
 - **Viscosidad cinemática** a la temperatura de transporte
 - **Coefficiente de compresibilidad** en distintas condiciones de presión y temperatura

La temperatura del gas está determinada, al igual que en el caso de oleoductos, por la correspondiente a la del terreno por la que atraviesa el ducto

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTO

- **Relación** entre las **características** del ducto y el gas. Dicha relación se establece mediante el **número Reynolds** y el **coeficiente de fricción** (ver Tema 2)

Cálculo del **número de Reynolds (Re)**

$$\boxed{Re = 354 \frac{Q}{D \cdot \nu}}$$

$Q =$ caudal (Nm^3/h) ; $D =$ diámetro interno (m)
 $\nu =$ viscosidad cinemática en las condiciones de operación ($\text{cts} = \text{mm}^2/\text{s}$)

Cálculo del **coeficiente de fricción**. Tras calcular el número de Reynolds es posible calcular el factor de fricción. La fórmula más empleada es la **de Colebrook**

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)}$$

$f =$ factor de fricción
 $\varepsilon =$ rugosidad absoluta del ducto (m)
 $D =$ diámetro interno (m)
 $Re =$ número de Reynolds

El diagrama de Moody también se emplea para el cálculo, vía gráfica, del factor de fricción

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

DIMENSIONAMIENTO DE GASODUCTO

- **Pérdida de carga** en el ducto. Teniendo en cuenta que los gasoductos transportan gas, la ecuación de energía de estado estable (ver [Tema 2](#)) quedaría resumida como sigue:

$$P_1^2 - P_2^2 = 5,42 \cdot 10^3 \cdot \frac{Q_s^2}{D^5} \cdot f \cdot L \cdot \gamma \cdot T_m \cdot Z_m$$

P_1 = presión inicial (kg/cm²)

P_2 = presión final (kg/cm²)

Q_s = caudal standard 15°C (Sm³/h)

D = diámetro interno (mm)

f = coeficiente de fricción

L = longitud de la tubería (km)

γ = peso específico del gas respecto al aire

T_m = temperatura de transporte (K)

Z_m = factor de compresibilidad a la presión media

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

RED DE GASODUCTOS

Los gasoductos componen las **Red de Transporte** (**Red de alta**) del sistema gasista y están a presiones elevadas para salvar grandes distancias con menores pérdidas

Los **tipos** de Red de Transporte son los siguientes:

- Red principal: Presión de servicio (PS) > 60 bar
- Red secundaria: $16 \text{ bar} < PS < 60 \text{ bar}$

Las Red de Transporte abastece a la **Red de Distribución** a consumidores (**Red de baja o Red de transporte terciario**)

Los **tipos** de Red de Distribución son los siguientes:

- Alta presión: $4 \text{ bar} < PS < 16 \text{ bar}$
- Media presión: $0,05 \text{ bar} < PS < 4 \text{ bar}$
- Baja presión: $0,05 \text{ bar} > PS$

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE GASODUCTOS

Además del propio ducto, una red de gasoductos se compone de otro tipo de elementos:

- **Estaciones de compresión**, que son las que mantienen la presión en el gasoducto, para compensar las pérdidas de carga y satisfacer la demanda energética
- **Estaciones de regulación y medición**, que se colocan a lo largo de la red para regular la presión, en función de las necesidades de distribución, medir caudales y filtrar impurezas que puedan acompañar al gas
- **Válvulas de seccionamiento y corte**, que se colocan en tramos de 10-30 km, para impedir fugas puntuales, facilitar los trabajos de mantenimiento y limpieza, y permitir la separación del gasoducto en secciones, las cuales pueden ser aisladas

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE GASODUCTOS

Dentro de las estaciones de compresión, el elemento más importante es el **compresor**, que:

- Es un máquina de émbolo (tipo cilindro-pistón)
- Funciona únicamente con materia en fase gas
- Comprime el gas dando lugar a un aumento de la temperatura de éste
- Facilita el trasvase de un contenedor a otro debido a la sobrepresión que genera

Normalmente el compresor va acompañado por otros componentes, como son:

- El **calderín de decantación**, que se ubica antes del compresor, con el fin de evitar entradas de líquido en el compresor
- El **separador de aceites**, que se sitúa después del compresor, con el objetivo de eliminar partículas de aceite generadas por la polimerización del gas debido al aumento de la temperatura

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO

La importancia del almacenamiento se incluye en el [Tema 2](#). Y en el caso de combustibles gaseosos, el almacenamiento se realiza en [depósitos](#)

Existen dos formas de almacenamiento de combustibles gaseoso, según el estado:

[Almacenamiento en estado gaseoso](#). El gas habitualmente se encuentra comprimido bajo presión elevada

[Almacenamiento en estado líquido](#). El gas es enfriado facilitando su licuefacción (paso del estado gaseoso al líquido). Este tipo de almacenamiento se puede dar:

- Mediante temperaturas criogénicas y a presión constante, o ligeramente mayor que la atmosférica
- Bajo presión, con lo que se requieren menores temperaturas que las anteriores

En cuanto a la instalación, el almacenamiento puede ser:

[Fijo](#) (tanque) o [Móvil](#) (en botellas, también denominadas balas)

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO

En función de la ubicación, el almacenamiento fijo se puede clasificar en (fig. 3.13):

- **Aéreo** (de superficie)
- **Semienterrado**
- **Enterrado**

Sus ventajas/desventajas se presentan en la tabla 3.14.

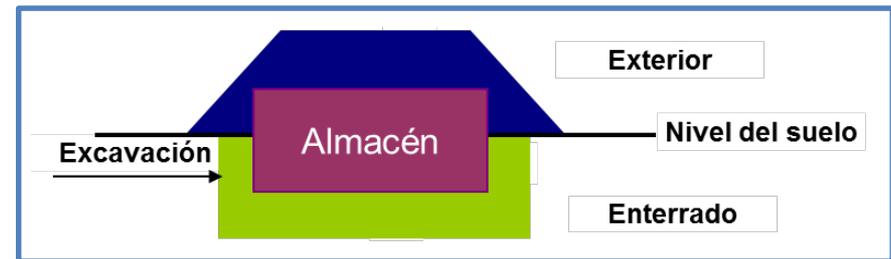


Figura 3.13. Posibles ubicaciones de almacenamiento de combustibles gaseosos.
Imagen propia

Tabla 3.14. Ventajas y desventajas de la ubicación de los depósitos para el almacenamiento de combustibles gaseosos

Aéreo	Enterrado	Semienterrado
<ul style="list-style-type: none"> – Presentan facilidad para su inspección, mantenimiento y limpieza – Requieren mayores distancias de seguridad – Requieren menor obra, resultando más económicos 	<ul style="list-style-type: none"> – Se deben extraer para la inspección reglamentaria – Resultan más seguros, debido a mayor protección frente a agentes externos, y son más estéticos – Requieren menor espacio, por menores distancias de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> – Presentan ventajas y desventajas similares a los aéreos y enterrados

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO AÉREO DE GLP

En este caso los depósitos fijos o tanques pueden ser: cilíndricos o esféricos, presentando el primero de ellos mayor necesidad de superficie de terreno por tener habitualmente una disposición horizontal

Cilíndricos (fig. 3.14)

- Se emplean preferentemente para propano



Figura 3.14. Tanque aéreo cilíndrico horizontal. Adaptación de la fotografía publicada por Nolundi Rawana en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[12\]](#)

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO AÉREO DE GLP

Esféricos (fig. 3.15). Este tipo de depósitos, cuyas ventajas/desventajas se reflejan en la tabla 3.15, pueden ser:

- A presión si almacenan butano (comprimido)
- Semirrefrigerados si se almacenan butano y propano (en estado líquido) indistintamente



Figura 3.15. Tanques aéreos esféricos. Fotografía publicada por Ikar.us en Wikimedia bajo licencia CC BY 2.0 [\[13\]](#)

Tabla 3.15. Ventajas y desventajas de la refrigeración o enfriamiento de depósitos

Ventajas	Desventaja
<ul style="list-style-type: none">– La presión interna del depósito es menor que la presión del producto a almacenar, por tanto el grosor de la pared del depósito es menor– Permite almacenar mayor cantidad de producto	<ul style="list-style-type: none">– Se requiere duplicar el sistema de refrigeración por situaciones de parada

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO AÉREO DE GN COMO GNL

En el caso de gas natural los tanques empleados son de “contención total”, (fig. 3.16) donde el gas está almacenado en fase líquida, a presión cercana a la atmosférica, gracias a la temperatura empleada, en torno a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura reduce el volumen del GN unas 600 veces

Los tanques de contención total se componen de tres elementos principales:

- Recipiente interno, también denominado “liner”
- Aislante
- Recipiente externo

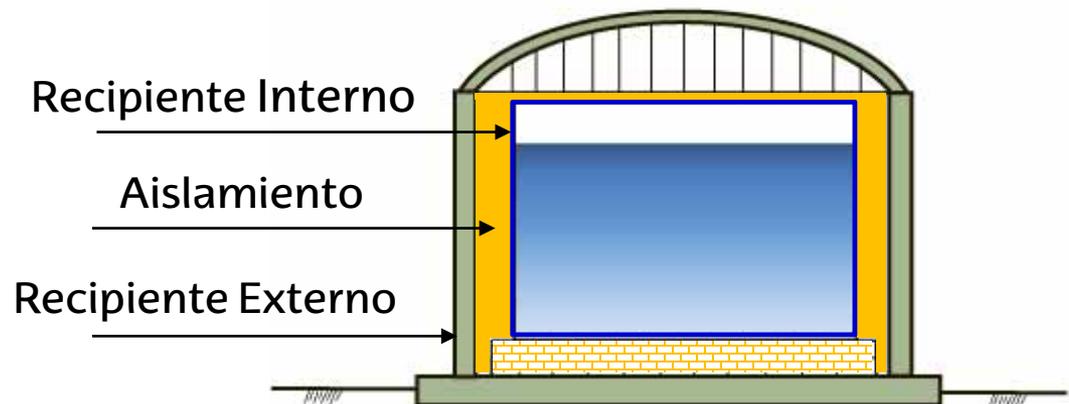


Figura 3.16. Tanque de contención total.
Adaptación de la imagen publicada por Vslv en
Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 4.0 [\[14\]](#)

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO AÉREO DE GN COMO GNL

En un tanque de contención total, el **recipiente interno**:

- Tiene la función de contener el GNL totalmente aislado en condiciones criogénicas
- Los materiales de construcción de éste deben presentar características mecánicas y de estanqueidad adecuadas. Por ello se emplean materiales tipo:
 - Hormigón pretensado
 - Chapa de acero aleado con un 9% en níquel
 - Aluminio (habitualmente empleado en el techo)
 - Acero inoxidable

Estos materiales por su coeficiente de contracción elevado, no se emplean habitualmente

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO ÁEREO DE GN COMO GNL

El **aislante**:

- Rodea completamente el recipiente interno, evitando las entradas de calor y por tanto reduciendo la tasa de evaporación
- La tasa de evaporación (E) es la cantidad, expresada en tanto por ciento y por día, de GNL que se evapora. Este parámetro es inversamente proporcional al espesor del aislamiento (e) y diámetro interno del tanque (D), siendo la expresión matemática que lo define la siguiente:

$$E = \frac{1,2}{e \cdot D}$$

El **recipiente externo**:

- Hace de soporte del aislante
- Es estanco para posibles situaciones de formación de vapores y posibles derrames de líquido

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROBLEMAS DEL ALMACENAMIENTO DE GASES LICUADOS

Los tanques de gases licuados presentan **problemas mecánicos, térmicos, propios y de estratificación**

Los diferentes **problemas mecánicos** de este tipo de tanques se pueden evitar teniendo en cuenta que éste debe:

- Contener el producto (problema de estanqueidad)
- Soportar su peso (problema de cimentaciones)
- Resistir las cargas hidrostáticas del líquido. Para ello, los materiales utilizados deben ser compatibles con la temperatura de trabajo
- Soportar la presión del gas que corona el líquido, ya que la presión del gas puede llegar a levantar la cubierta (problema de anclaje)
- Presentar resistencia a elementos externos, como por ejemplo: empuje del viento y peso de la nieve (problema de anclaje)
- Resistir a acontecimientos excepcionales (seísmos, caídas de objetos volantes, proyectiles, etc.)

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROBLEMAS ALMACENAMIENTO DE GASES LICUADOS

Los **problemas térmicos** se deben a las entradas de calor, las cuales pueden dar lugar a una mayor tasa de evaporación

Dichas entradas pueden ser por:

- Radiación y Convección, ambas con débil papel en la evaporación
- Conducción: modo esencial de transmisión de calor en este caso

Por ello es importante que la tasa de evaporación sea lo más baja posible. Este objetivo se logra con un buen aislamiento y un elevado diámetro del tanque.

- Un ejemplo son los depósitos de terminales marítimos, donde el valor de la tasa de evaporación se sitúa entre 0,04-0,1%

En caso de una tasa de evaporación elevada se debería de equipar el tanque con dispositivos adecuados (válvulas de seguridad, antorchas, compresores) para la evacuación de los gases.

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROBLEMAS ALMACENAMIENTO DE GASES LICUADOS

Los problemas térmicos son el origen de los **problemas propios**. Estos problemas se asocian a la evaporación de los componentes más volátiles. En el caso particular del GNL, se debe a la evaporación del N_2 y CH_4 , que da lugar a que:

- La fase gaseosa se enriquezca en los componentes más volátiles
- La fase líquida se empobrezca en volátiles y se enriquezca en hidrocarburos superiores (C_3+)

Manteniendo así el GNL el suficiente tiempo, puede llegar a sufrir el proceso de “envejecimiento”, que se puede evitar mediante:

- Un aislamiento más eficaz para reducir la tasa de evaporación
- El aporte de GNL fresco procedente de un metanero, cuando el tanque esté situado en una terminal marítima
- La relicuefacción de las evaporaciones (paso de la fase gas a la fase líquida de la parte vaporada de producto), mediante equipos adecuados

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

PROBLEMAS ALMACENAMIENTO DE GN COMO GNL

Los **problemas de estratificación** se producen cuando un depósito de gas licuado se llena con otro gas licuado de diferente composición y densidad.

En ciertas condiciones, los gases licuados no se mezclan y se genera el **fenómeno de "estratificación"**

- El gas licuado más denso ocupa la parte baja del tanque

Los problemas térmicos provocan que las capas inferiores se calienten, se reduzca su densidad y tiendan a subir, ocupando el estrato superior las capas más densas.

Esta situación se considera inestable y se resuelve con el **"roll-over"** (movimientos de convección rápidos), haciendo que el gas licuado del fondo remonte hacia la superficie del depósito.

Para evitar este problema, en los depósitos se suelen instalar bombas sumergidas colgadas del techo que recirculan parte del gas licuado. También se instalan controladores de temperatura y densidad.

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

El **almacenamiento subterráneo** es un tipo de almacenamiento empleado, principalmente, para gases.

Las ventajas de este tipo de almacenamiento son las siguientes:

- Interés económico, ya que las inversiones son menores. Habitualmente este tipo de almacenamiento son yacimientos ya agotados
- Seguridad, debido a que el almacenamiento está aislado de la superficie, lo que permite su instalación debajo de la instalación de superficie
- Resistente frente a terremotos
- Respetuoso con el medio ambiente, ya esta tecnología evita la contaminación de acuíferos y migración de posibles contaminantes
- Facilidad de la operación y reducción de costes, en cuanto a mantenimiento, empleo de equipos y materiales

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

En el almacenamiento subterráneo es muy importante distinguir entre, gas colchón y gas útil.

Gas colchón

- Se denomina también **gas no útil**
- Mantiene la presión para proporcionar una adecuada extracción, entendida ésta como entregabilidad
- En un yacimiento parcialmente agotado, el ahorro de gas colchón es considerable

Gas útil

- Se denomina también **gas disponible** o **gas de trabajo**
- Es el gas que puede ser extraído
- Además mide la capacidad del almacenamiento
- Equivale a la diferencia entre gas total y gas colchón

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

Existen diferentes técnicas de almacenamiento subterráneo (fig. 3.18), entre las que caben mencionar, **formaciones salinas, minas abandonadas y rocas porosas.**

Las **formaciones salinas**, formadas por capas de sal fija a una profundidad de 200-2000 m, se pueden emplear como almacenamiento subterráneo si la propia sal cumple requisitos, tales como:

- Resistencia moderadamente alta
- Fluencia plástica, que permite el sellado de posibles fracturas
- Valores de porosidad y permeabilidad casi nulos, para evitar el escape del contenido y de esta manera mantener la productividad
- Larga estabilidad natural
- Física y químicamente inerte al producto que contiene

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

Las **formaciones salinas** se crean introduciendo agua fresca y disolviendo, mediante lixiviación, la sal contenida hasta obtener el volumen de cavidad deseado. La **lixiviación** (fig. 3.17) puede ser **directa** o **inversa** (esta clasificación se debe a las posiciones relativas de inyección de agua y extracción de salmuera), dando lugar a diferentes estructuras de cavidad.

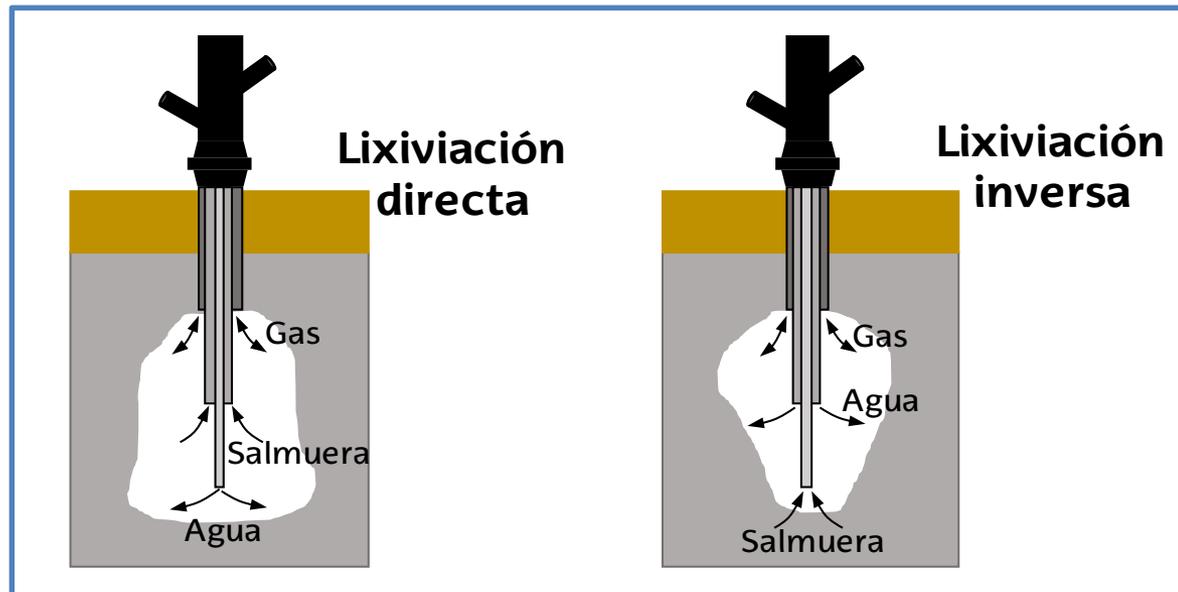


Figura 3.17. Tipos de lixiviaciones para la creación de cavidades salinas. Imagen propia

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

En cuanto al empleo de **minas abandonadas** como almacenamiento subterráneo, éstas deben cumplir diferentes condiciones:

- Las zonas de la mina que se vayan a emplear para este fin deben cumplir criterios rigurosos de estabilidad y estanqueidad. Para ello suele ser necesario:
 - Realizar trabajos importantes de refuerzo y adecuación
 - Evitar zonas inestables de la misma
- Presentar suficiente profundidad para que se cumpla el principio de confinamiento hidráulico, definido éste como la profundidad de la cavidad que asegure que el agua contenida naturalmente en la roca circundante se dirija hacia la cavidad, evitando la migración del producto almacenado
- Durante su explotación se deben controlar:
 - La estabilidad de la mina mediante un control sísmico
 - La hidrogeología mediante piezómetros

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

Las **rocas porosas** (fig. 3.18), que comúnmente se crean a partir de yacimientos agotados, suelen contener el gas colchón necesario para operar la instalación y además se emplean como almacenamiento estacional o estratégico

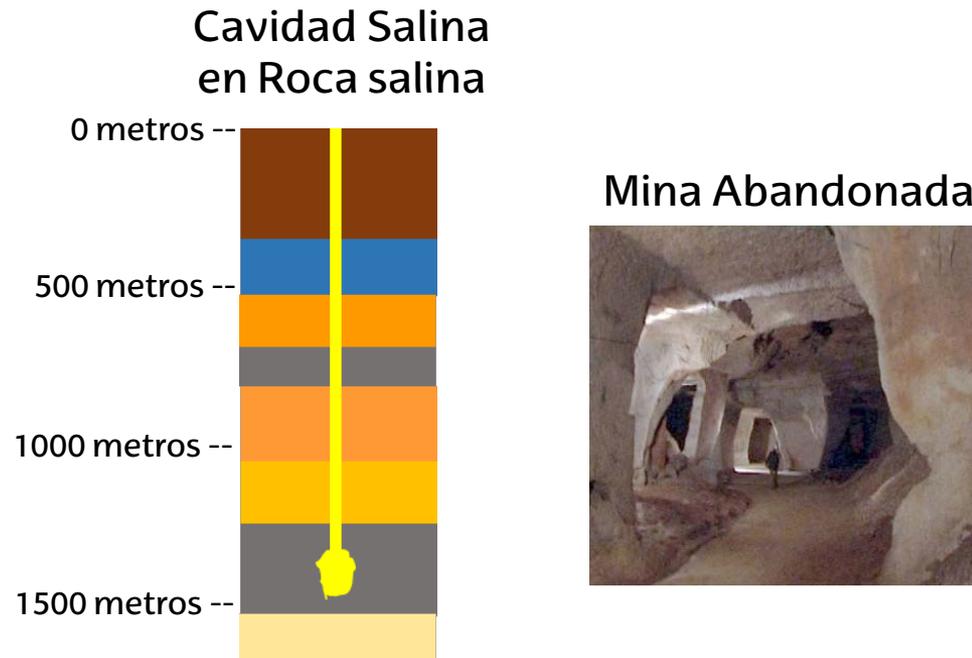


Figura 3.18. Sistemas de almacenamiento subterráneo. Adaptación de imagen propia e imagen publicada por John Scott en Geograph photograph every grid square bajo licencia CC BY-SA 2.0 [\[15\]](#)

TEMA 3 ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO

La **selección** del mejor almacenamiento subterráneo se realiza en función de **parámetros**, tales como:

- **Condiciones geológicas.** Dentro de este parámetro es importante tener en cuenta la presencia de capas de sal en profundidad adecuada, cantidades importantes de agua natural que permitan que se dé el principio de confinamiento hidráulico, tipo de estructura de la roca con suficiente resistencia y que garantice la estanqueidad, etc.
- **Capacidad de almacenamiento.** Como pauta general para volúmenes pequeños, de entre 5000 y 20000 m³, se suelen seleccionar estructuras rocosas. Mientras que volúmenes grandes, en torno a 20000-x00000 m³ (donde x puede tomar valores de 1 a 9), se opta por cavidades rocosas o de sal
- **Temperatura de almacenamiento.** Para gases comprimidos a temperatura ambiente, la selección se dirige hacia el uso de cavidades rocosas o de sal. Mientras que para gases enfriados se opta por cavidades con rocas enfriadas o semienfriadas

PLANTAS DE REGASIFICACION

REGASIFICACIÓN DEL GAS NATURAL LICUADO PARA SU DISTRIBUCIÓN

Los tanques de contención total de GNL, habitualmente, se ubican en **plantas de regasificación (regasificadoras)** o **plantas satélite de regasificación**, ya que en éstas el GNL se vaporiza para, posteriormente, ser distribuido como GN

Una **planta satélite de regasificación** tiene la misma función que una planta de regasificación, con la diferencia de que el suministro y abastecimiento de producto es a zonas que no disponen de red de abastecimiento de gas natural.

El proceso de regasificación consta de diferentes etapas/elementos, siendo éstos :el transporte, la **descarga de GNL**, la **transferencia hacia los tanques**, el **almacenamiento**, las **bombas primarias**, el **boil-off**, el **relicuador**, las **bombas secundarias**, la **vaporación y**, la **medición y odorización** (**ACCESO A DIFERENTES VIDEOS SOBRE EL PROCESO DE REGASIFICACIÓN DE GAS NATURAL LICUADO: VIDEO 1 Y VIDEO 2**)

- Video 1: disponible en la dirección <http://www.gascan.es/web-es/el-gas-natural/proceso-de-regasificacion> de una empresa de transporte de gas natural de las Islas Canarias (último acceso 13/04/2018)
- Video 2: disponible en la dirección <http://www.gnlquintero.com/terminal/proceso.htm> de una empresa de regasificación de GNL en Chile (último acceso 13/04/2018)

PLANTAS DE REGASIFICACION

ETAPAS Y ELEMENTOS

1. Transporte. Éste se realiza como **gas licuado**, es decir como GNL, a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 0,25 bar de sobrepresión **vía marítima** en buques metaneros de doble casco
2. Descarga del GNL. La transferencia desde el buque la planta de regasificación se realiza mediante **brazos de descarga**, los cuales incorporan válvulas de seguridad para evitar pérdidas o derrame del GNL
3. Transferencia hacia los tanques. Las **bombas** de los metaneros impulsan el GNL hasta los tanques de almacenamiento mediante los **brazos de descarga y tuberías criogénicas**
4. Almacenamiento. Son **tanques de contención total** (apartado 3.3.1), donde el GNL se almacena a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$
5. Bombas primarias. Éstas se encuentran **sumergidas en el tanque de contención total** y extraen el GNL en función de la demanda
6. Boil-off. Se denomina así a la **parte de GNL que se evapora** (pasando a ser GN) debido a pequeñas entradas de calor del exterior. Esta parte se debe relicuar (convertir gas a liquido) para evitar la pérdida de GNL

PLANTAS DE REGASIFICACION

ETAPAS Y ELEMENTOS

7. Relicador. Es un recipiente donde se mezclan el boil-off y el GNL impulsado por las bombas primarias. Esta mezcla permite convertir todo el boil-off en GNL y por tanto aprovechar todo el GNL almacenado
8. Bombas secundarias. Elevan la presión del GNL desde 7-8 bar (presión de bombas primarias y relicador) hasta los 72 bar necesarios para poder transportarlo, y lo impulsan aún en estado líquido a unos $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$
9. Vaporización. El GNL, a $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$, se hace pasar por los vaporizadores para convertir el GNL a gas, que estará a temperaturas entre 0 y $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los vaporizadores están formados por tubos por donde circula el GNL y se pone en contacto con agua de mar, cuya temperatura baja a $3-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
10. Medición y odorización. Las funciones de esta etapa son: medir fiscalmente la cantidad de producto puesta en red, para su suministro, y aditarlo con componentes que detecta el olfato humano (compuestos sulfurados, que habitualmente son mercaptanos). Esta etapa es el fin del proceso de regasificación

CADENA DE GAS NATURAL

RELACIÓN ENTRE APROVISIONAMIENTO Y LOGÍSTICA DE GN

La producción, transporte y almacenamiento de gases licuados sigue la relación presentada en la fig. 3.19.

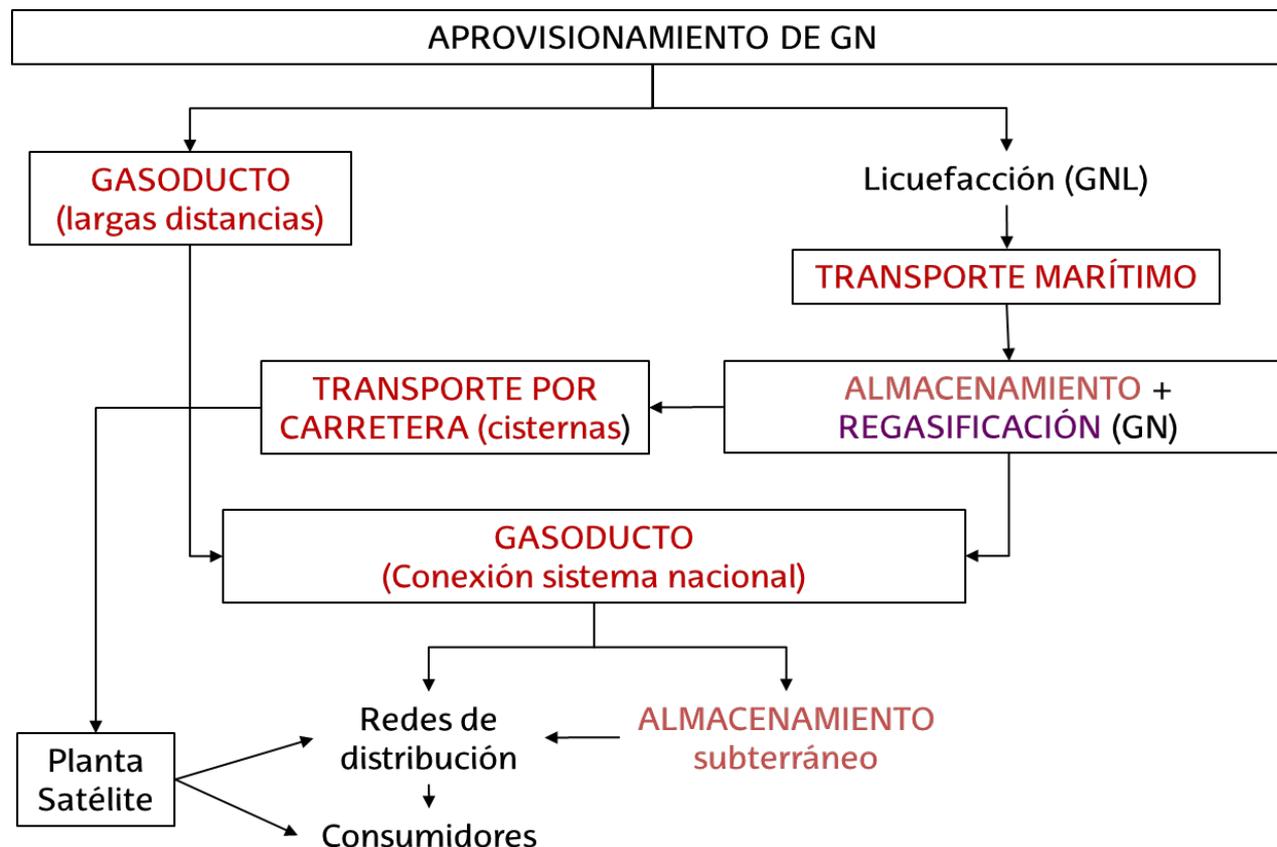


Figura 3.19. Esquema de la cadena de gas natural. Imagen propia