



TEMA 2: COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

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 LÍQUIDOS

2.1. Combustibles líquidos

2.1.1 Tipos de combustibles líquidos

2.1.2. Características generales

2.1.3. Especificaciones de combustibles líquidos ligeros y pesados

2.2. Transporte de combustibles líquidos

2.2.1. Tipos de transporte

2.2.2. Dimensionamiento de tuberías. Oleoductos

2.3. Almacenamiento de combustibles líquidos

2.3.1. Normativa y tipos de almacenamiento

2.3.2. Elementos básicos

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los combustibles líquidos se encuentran en dicho estado a temperatura ambiente y presión atmosférica.

Existe gran variedad de combustibles líquidos. Atendiendo al **origen** se pueden diferenciar en combustibles fósiles y biocombustibles:

1) Fósiles: obtenidos a partir de la transformación de restos de plantas y animales, proceso que ocurre a lo largo de millones de años:

- **Derivados del petróleo:** obtenidos por destilación y posterior conversión y tratamiento, tales como: la gasolina, keroseno, gasóleo y fuelóleo.

- **Derivados del carbón:** obtenidos por licuefacción directa/indirecta

*También deberían tenerse en cuenta los combustibles líquidos obtenidos a partir de la licuefacción de combustibles gaseosos de origen fósil.

2) Biocombustibles: obtenidos a partir de biomasa o materia vegetal.

- Por ejemplo: aceites vegetales, biodiesel, bioetanol, etc.

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Los combustibles líquidos de mayor tradición y uso son los **derivados del petróleo**.

El **petróleo** se puede definir como una compleja mezcla de **naturaleza orgánica**, formada por hidrocarburos y otros compuestos de C e H con cantidades de S, N, O y otras menores de Ni, V, Na y otros metales.

El color del petróleo puede variar desde el amarillo hasta el negro (fig. 2.1)

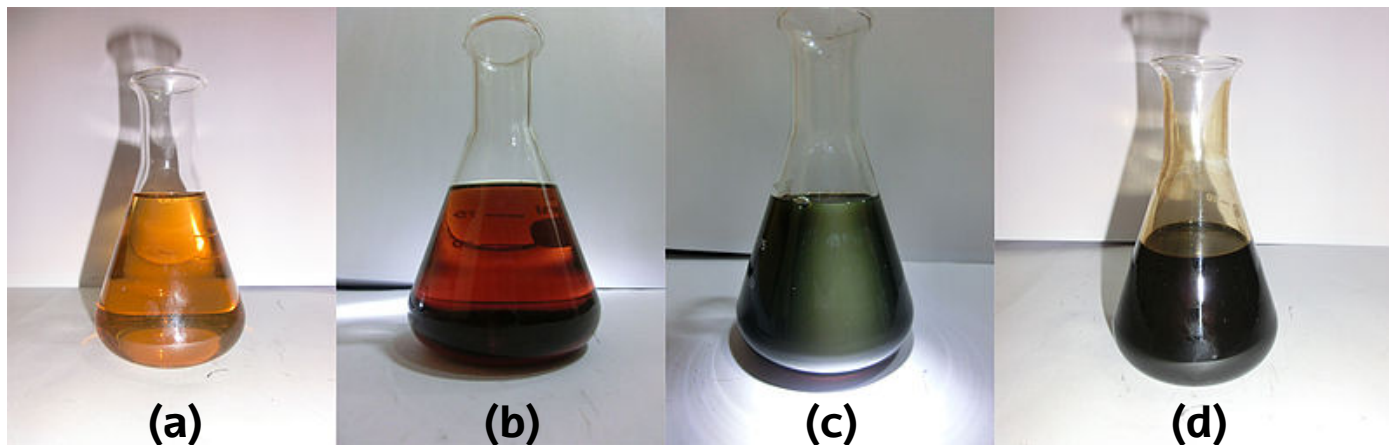


Figura 2.1. Color de los crudos de distinta procedencia (a) Cáucaso (b) Oriente Medio (c) Arabia y (d) Francia. Imagen de Glasbruch 2007 publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[1\]](#)

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

El petróleo se forma mediante transformaciones biológicas y geológicas de **restos de animales y plantas** a grandes profundidades de la tierra o del mar durante millones de años (fig. 2.2), por acción de **bacterias anaeróbicas, altas presiones y altas temperaturas**, entre capas de sedimentos → **NATURALEZA FÓSIL**.

Aparece en depósitos subterráneos en estado líquido, impregnando rocas permeables y porosas, sometido a altas presiones → por ser líquido puede fluir lejos de su lugar de formación.

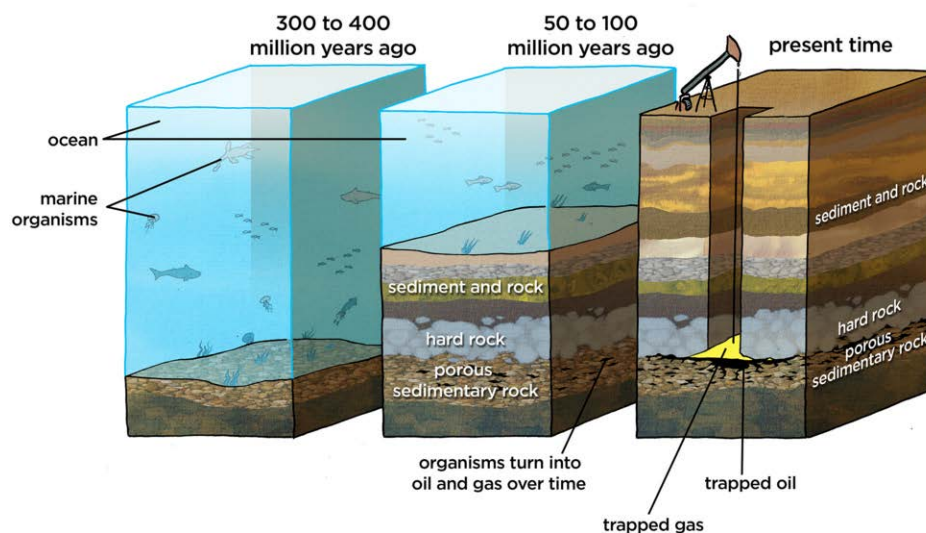


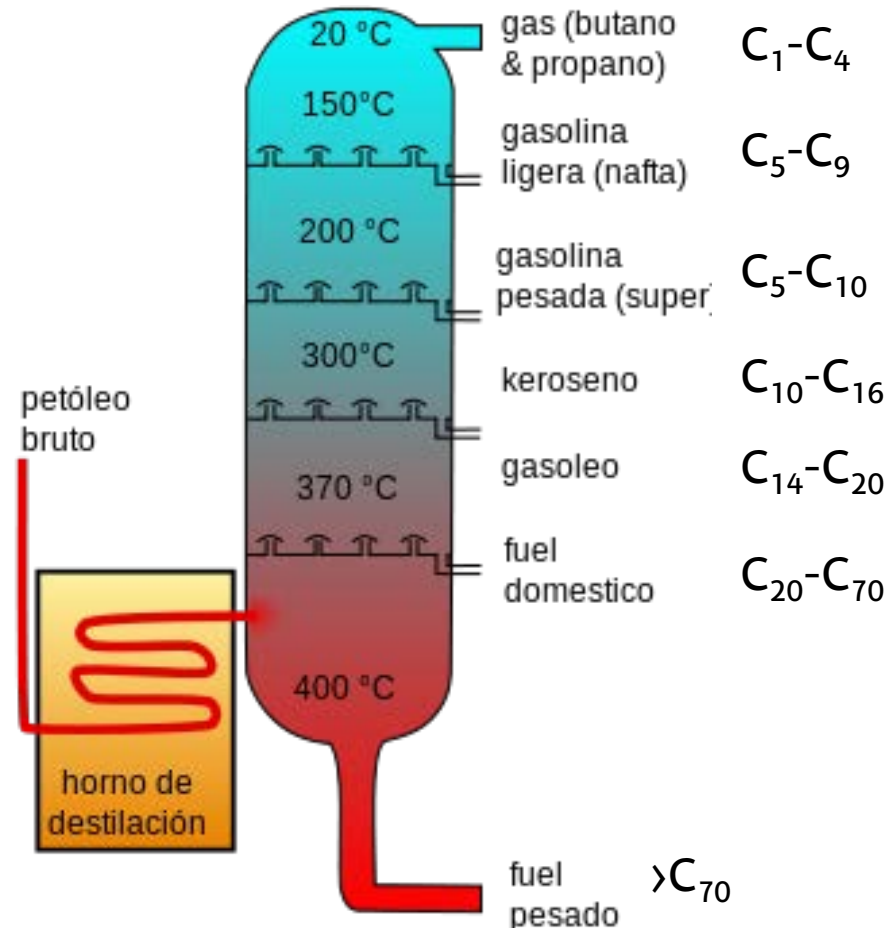
Figura 2.2. Proceso de formación de petróleo y gas natural. Ilustración utilizada en Siyavula Gr 7-9 Natural Sciences y publicada en Flickr bajo licencia CC BY 2.0 [2]

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

En la figura 2.3 se muestran los derivados del petróleo más importantes, obtenidos mediante **destilación fraccionada** del crudo de petróleo. Los combustibles líquidos de menor a mayor punto de ebullición son: gasolina, keroseno, gasóleo y fuelóleo.

Figura 2.3. Destilación fraccionada del petróleo y productos obtenidos. Diagrama de Theresa Knott, modificado por Ortisa y publicado en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[3\]](#)



COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Combustibles comerciales: en la tabla 2.1 se recoge una relación de los combustibles líquidos comerciales más utilizados en España.

Tabla 2.1. Combustibles líquidos comerciales, aplicación y especificaciones

Nombre comercial	Aplicación	Especificaciones
Gasolina 95 Gasolina 98	Automoción Automoción	Real Decreto 61/2006 Real Decreto 1088/2010
Gasóleo A Gasóleo B Gasóleo C	Automoción Agrícola/marítimo Calefacción	Real Decreto 61/2006 Real Decreto 1361/2011 (gasóleo B) Real Decreto 1088/2010
fuelóleo 1 fuelóleo 2 fuelóleo intermedio (IFO)	Calefacción Marítimo Marítimo	Real Decreto 61/2006 Real Decreto 1088/2010 RD 1027/2006 (uso marítimo)
Keroseno: JET A-1, JP8	Aviación	Especificaciones internacionales
Biocarburantes	Automoción	Real Decreto 61/2006 Real Decreto 1088/2010

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

En el caso de **gasolinas**, **gasóleos**, **fuelóleo** y determinados **biocarburantes**, las especificaciones vienen dadas mediante Reales Decretos (RD), en los que se indican los métodos de ensayo normalizados (ASTM, UNE EN-ISO) para la determinación de cada una de las propiedades especificadas, así como sus valores límite.

[RD 61/2006](#) de 31 de enero, en lo relativo a las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de determinados biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

MODIFICADO POR:

[RD 1361/2011](#) → especificaciones técnicas del gasóleo denominado clase B.

[RD 1088/2010](#) → especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de combustibles para uso marítimo.

[RD 1027/2006](#) → contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

En el caso de los **kerosenos**, se deben cumplir rigurosas normas internacionales establecidas mediante la *Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems* (AFQRJOS)

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Como derivados del petróleo que son, están formados básicamente por **compuestos hidrocarbonados**, pudiendo incluir también **azufre, nitrógeno, oxígeno, etc.**

Los principales parámetros, además de la composición (análisis elemental), utilizados para caracterizar los combustibles líquidos son:

- Poder calorífico
- Densidad
- Viscosidad
- Volatilidad
- Punto de inflamación y punto de ignición
- Punto de congelación

Además, tal y como se verá más adelante, cada combustible tendrá unas especificaciones propias. Por ejemplo, el número de octano en el caso de las gasolinas.

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

▪ **Análisis elemental:** indica el contenido (% peso) de humedad, cenizas, carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno (fig. 2.4). El contenido en azufre debe ser lo más bajo posible. Algunos metales, por ejemplo el vanadio, pueden encontrarse en concentraciones traza.

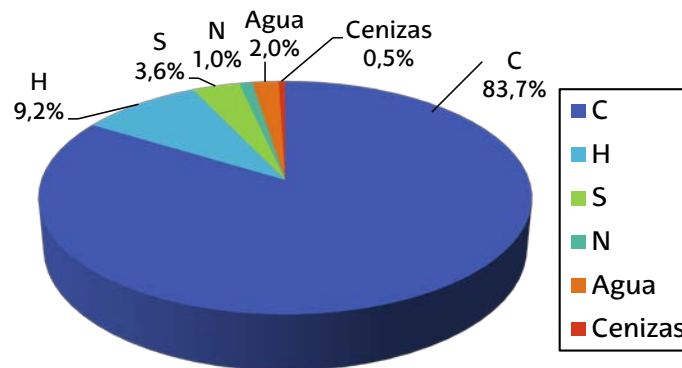


Figura 2.4. Análisis elemental (% peso) de un fuelóleo. Imagen propia a partir de datos de Brizuela y Romano, 2010 [4]

- **Poder calorífico:** calor liberado por unidad de masa (kcal/kg o MJ/kg) en la combustión del combustible líquido en condiciones estandarizadas.
- **Poder calorífico superior (PCS):** el agua en los gases de combustión está en estado líquido. Suele medirse en bomba calorimétrica.
 - **Poder calorífico inferior (PCI):** el agua en los gases de combustión está en estado vapor. Se calcula a partir del PCS, con la fórmula:

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

584 kcal/kg vapor a 25 °C,
(Collieu y Powney, 1977)

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

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Densidad absoluta (δ):** relación entre la masa y el volumen de una sustancia ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).
- **Densidad relativa (δ_r):** relación entre la densidad de una determinada sustancia y la densidad del agua a 4 °C y 1 atm (adimensional).

Grados API (API: *American Petroleum Institute*): escala de densidad que indica si, a una determinada temperatura, normalmente a 15 °C, el petróleo o derivado flota en el agua. Si la densidad es >10 °API el combustible flota en el agua.

La densidad suele medirse en el laboratorio mediante un densímetro o picnómetro (fig. 2.5) a 10 °C, 50 °C y 100 °C.



Figura 2.5. Densímetro y picnómetro para la medida de densidad de combustibles líquidos. Imágenes propias

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Viscosidad:** medida de la resistencia interna del combustible líquido al desplazamiento de sus moléculas, que tiene que ver con el rozamiento interno de las mismas.

$$\text{Viscosidad cinemática } (\nu) = \frac{\mu}{\delta} \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

$$\text{Viscosidad dinámica } (\mu) \quad (1 \text{ Po} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$\text{Densidad absoluta } (\delta) \quad (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$$

Suele medirse a diferentes temperaturas (10 °C, 50 °C y 100 °C). En el laboratorio puede determinarse mediante un **viscosímetro Brookfield** (fig. 2.6) que mide el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en el combustible líquido en cuestión. Dicho par de torsión es proporcional a la viscosidad del fluido.



Figura 2.6. Viscosímetro.
Imagen propia

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Volatilidad:** tendencia del combustible líquido a evaporarse en determinadas condiciones de presión y temperatura; se determina mediante la **curva de destilación**, basándose en ensayos normalizados en los que se destila un determinado volumen de combustible (100 mL) y se hallan los siguientes puntos característicos:
 - **Punto inicial** (temperatura a la que se recoge la primera gota de destilado)
 - **Punto final** (temperatura máxima alcanzada una vez finalizada la destilación)
 - **Volumen de pérdidas (P)**
 - **Volumen de residuo que no pasa a fase vapor (r)**
 - **Volumen de destilado recogido (R)**
- Las pérdidas se calculan por diferencia:
 $P = 100 - (R + r)$

*También se miden las **temperaturas** a las que se recoge un determinado volumen de destilado (0, 10, 30, 50, 70, 90, 95 %) y la **presión de vapor**.

*Los resultados se corrigen en base a la presión del ensayo para referirlas posteriormente a 760 mm Hg.

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- **Punto de inflamación:** temperatura a la que un combustible emite gases inflamables suficientes para que se produzca la combustión no automantenida (con llama auxiliar, fig. 2.7). Es indicativo del contenido en compuestos volátiles.



Figura 2.7. Llama en chimenea de bioetanol. Fotografía bajo licencia CC0 [\[5\]](#)

- **Punto de ignición:** temperatura a la que el combustible arde de forma espontánea, sin necesidad de aplicar una llama.
- **Punto de congelación:** temperatura a la que, cuando se somete al combustible al enfriamiento controlado, aparecen los primeros cristales. Es indicativo del contenido en parafinas (alcanos lineales) pesadas, que son los primeros en cristalizar. Es importante en kerosenos

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASOLINAS

- **Presión de vapor Reid (kPa):** presión de equilibrio entre el combustible líquido vaporizado y aire a una determinada temperatura. Se utiliza como medida indirecta de la volatilidad de una gasolina. Existe diferencia en los valores en verano y en invierno.
- **Número de octano (NO):** medida del poder antidetonante de las **gasolinas**
 - Cuanto mayor es el **octanaje**, mejor es el rendimiento y tiene mayor precio.
 - Se mide tomando mezclas de i-octano (NO=100) y n-heptano (NO=0) (fig.2.8)

Por ejemplo, una mezcla i-octano/n-heptano 95/5 %, tendrá un NO=95

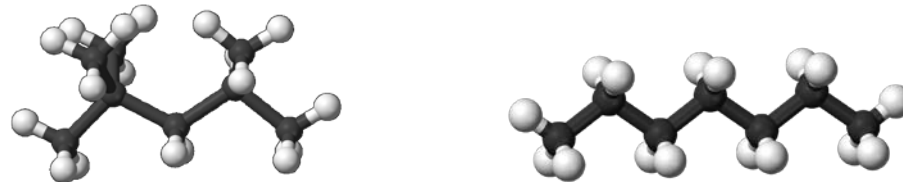


Figura 2.8. i-octano (2,2,4-trimetilpentano) [6] y n-heptano [7]
Figuras publicada en Wikimedia bajo dominio público

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASOLINAS

Los **agentes antidetonantes** mejoran el octanaje de las gasolinas. Hoy en día se utilizan entre otros, metilciclopentadienil tricarbonilo de manganeso (MMT) y etil terc-butil éter (ETBE).

Mediante ensayos normalizados se determinan dos tipos de octanaje:

- **Research Octane Number (RON):** número de octano con el motor a baja carga, simulando el comportamiento en ciudad: bajas revoluciones y numerosas aceleraciones. Indica el octanaje de la gasolina comercial.
- **Motor Octane Number (MON):** número de octano con el motor a alta carga, simulando el comportamiento en carretera: altas revoluciones y gran esfuerzo térmico (el combustible está precalentado).
- **Sensibilidad:** diferencia entre RON y MON (RON > MON)

Por ejemplo, en la gasolina 95 (fig 2.9, tabla 2.2):
RON > 95; MON > 85

Figura 2.9. Surtidor de gasolina 95 y 98.
Adaptada a partir de imagen de Dario Alvarez
publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY 2.0 [8]



COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASÓLEOS

Gasóleo: mezcla de hidrocarburos líquidos obtenida en la destilación fraccionada del petróleo, más pesada que el keroseno. Además de las características indicadas (tabla 2.3) el [RD 1088/2010](#) incluye la curva de destilación, el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos, corrosión, residuo carbonoso y partículas, etc.

Tabla 2.3. Resumen de las especificaciones de gasóleos de automoción (clase A)

Propiedades	Límites	
	Mínimo	Máximo
Densidad a 15 °C	820 kg·m ⁻³	845 kg·m ⁻³
Viscosidad cinemática (40 °C)	2,00 mm ² ·s ⁻¹	4,50 mm ² ·s ⁻¹
Número de Cetano / Índice de Cetano	51,0 / 46,0	-
Punto de inflamación	> 55 °C	
Punto de obstrucción filtro frío invierno/verano	-	-10 °C / 0 °C
Contenido en azufre	-	10 mg·kg ⁻¹
Contenido en partículas sólidas	-	24 mg·kg ⁻¹
Color / transparencia y brillo	Nº2 / criterios ASTM 04176	

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASÓLEOS

Además de las características indicadas (tabla 2.4) el [RD 1088/2010](#) incluye la curva de destilación, corrosión, estabilidad a la oxidación, residuo carbonoso contenido en agua / partículas (clase B) y agua+sedimentos y cenizas (clase C)

Tabla 2.4. Resumen de las especificaciones de los gasóleos para uso agrícola, y marítimo (clase B) y de calefacción (clase C)

Propiedades	Gasóleo B	Gasóleo C
Densidad a 15 °C (mín/máx)	820/880kg·m ⁻³	-/900 kg·m ⁻³
Color	Rojo	Azul
Contenido en azufre (máx)	1000 mg·kg ⁻¹ (1)	1000 mg·kg ⁻¹
Índice de Cetano / Número de Cetano (mín)	46/49	-
Viscosidad cinemática a 40 °C (min/máx)	2,0/4,5 mm ² ·s ⁻¹	-/7,0 mm ² ·s ⁻¹
Punto de inflamación (min)	60 °C	60 °C
Punto de obstrucción filtro frío en invierno/verano (máx)	-10/0 °C	-6/-6 °C
Punto de enturbiamiento en invierno/verano (máx)	-	4/4 °C
Contenido en partículas sólidas		24 mg·kg ⁻¹
Transparencia y brillo	Cumple (ASTM D 4176)	

(1) [RD 1361/2011](#): "A partir del 1/01/2011, el contenido máximo autorizado de S será de **10 mg/kg**, pudiéndose producir entregas a usuarios finales con un contenido en S de hasta **20 mg/kg**, como consecuencia de la contaminación en la cadena de suministro"

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASÓLEOS

- **Número de cetano (NC):** indica el tiempo que transcurre desde que el **gasóleo** se inyecta en el motor hasta que comienza su ignición
 - Cuanto mayor es el NC mejor rendimiento, debido a que se forman menos inquemados y mejora el arranque, tiene mayor precio
 - Se toman como referencia el cetano (hexadecano, NC=100) y el α -metilnaftaleno (NC=0) (fig 2.10)

$NC_{\text{aromáticos}} < NC_{\text{parafinas}}$

Por ejemplo, una mezcla cetano/ α -metilnaftaleno 55/45 NC=55.

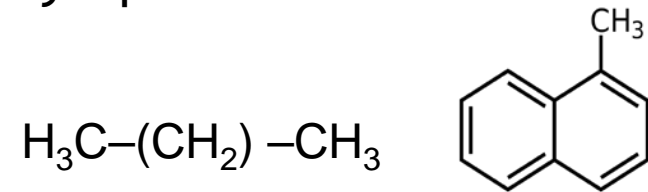


Figura 2.10. Cetano (izda) y α -metilnaftaleno (dcha), figura publicada en Wikimedia bajo dominio público [9]

El NC se mide a temperatura y presión controladas, mediante ensayo normalizado en un motor diesel monocilíndrico estándar (**CFR Cetane Engine**)

- Gasóleos comerciales: NC \approx 49-51
- Gasóleos para motores de alta velocidad: NC \approx 45-55

El ensayo tiene alto coste: motor CFR y reactivos cetano y α -metilnaftaleno

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE GASÓLEOS

Debido al alto coste del ensayo para la determinación de número de cetano, habitualmente se determina el **índice de cetano (IC)**, a partir de la densidad y el punto de ebullición de los hidrocarburos base del gasóleo. La relación entre ambos parámetros es: $NC \approx IC + 3$

Los aditivos empleados para mejorar el número de cetano son, entre otros, nitratos de alquilo y peróxido de di-terc-butil.

- **Punto de obstrucción filtro frío:** temperatura más baja a la que un volumen dado de gasóleo pasa a través de dispositivo de filtración estandarizado en un tiempo dado. Indica la temperatura más baja que un combustible fluirá sin problemas. Existe diferencia en los valores en verano y en invierno.
- **Punto de enturbiamiento:** temperatura mínima por debajo la cual las parafinas que contiene el gasóleo adquieren una apariencia turbia. Los filtros de combustible, inyectores, etc. pueden obstruirse por parafinas solidificadas.
- **Residuos de la combustión:** se determina la composición de los residuos carbonosos y de las cenizas, así como el punto de fusión de las cenizas

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE FUELÓLEO

Fuelóleo: combustible pesado que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada del petróleo, que también puede utilizarse para la obtención de subproductos como aceites lubricantes y asfaltos. Además de las especificaciones de la tabla 2.5 el [RD 61/2006](#) incluye, entre otras, la estabilidad.

Tabla 2.5. Resumen de las especificaciones de fuelóleo

Propiedades	Límites	
	Mínimo	Máximo
Viscosidad cinemática (50 °C)	-	380 mm ² ·s ⁻¹
Punto de inflamación	65 °C	-
PCS/PCI	10000 / 9500 kcal·kg ⁻¹	-
Contenido en azufre	-	1,0 % m/m
Contenido en agua y sedimentos	-	1,0 % v/v
Contenido en cenizas	-	0,15 % m/m
Contenido en vanadio	-	300 mg·kg ⁻¹
Color	negro	

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE FUELÓLEOS

La principal aplicación de los fuelóleos es como **combustibles**: fuelóleos nº 1 y nº 2 (para calefacción y uso marítimo, respectivamente) y el fuelóleo denominado IFO's (Intermediate Fuel Oil) para uso marítimo. En la fig. 2.11 se muestra una fotografía de un fuelóleo residual.

Dada la menor demanda del fuelóleo como combustible en comparación a la de otros combustibles líquidos, también se utilizan para la obtención de subproductos, por ejemplo, mediante el proceso denominado **coquización retardada** pueden obtenerse gases licuados del petróleo, gasolinas, gasóleos y coque de petróleo.



Figura 2.11. Fuelóleo.
Fotografía de Glasbruch2007
publicada en Wikimedia bajo
licencia CC BY-SA 3.0 [\[10\]](#)

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE KEROSENOS

Keroseno: mezcla de hidrocarburos líquidos obtenida en la destilación fraccionada del petróleo, más pesada que la gasolina y más ligera que el gasóleo. En la tabla 2.6 se recogen las especificaciones del keroseno JET A-1.

Tabla 2.6. Resumen de las especificaciones de keroseno JET A-1 (AFQRJOS [\[11\]](#))

Propiedades		Límites	
		Mínimo	Máximo
Aspecto visual		Claro y brillante, sin que se aprecie visualmente materia en suspensión	
Contaminación por partículas		-	1,0 mg L ⁻¹
Composición	Acidez total	-	0,015 mg KOH·g ⁻¹
	Aromáticos	-	25,0 (%vol./%vol)
	Azufre, total	-	0,30 (%m/%m)
	Azufre, mercaptanos	-	0,0030 (%m/%m)
Contenido en FAME (<i>Fatty Acid Methyl Ester</i>)		-	50 mg·kg ⁻¹
Punto de inflamación		38 °C	
Densidad (15 °C)		775,0 kg·m ⁻³	840 kg·m ⁻³
Viscosidad (-20 °C)		-	8000 mm ² ·s ⁻¹
Punto de congelación		-	- 47 °C
Poder calorífico		42,80 MJ·kg ⁻¹	

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESPECIFICACIONES DE KEROSENOS

Dos de las especificaciones más importantes del keroseno son el **punto de inflamación** y el **punto de congelación**, ya que deben ser manipulados con seguridad y se deben evitar obstrucciones por congelación debido a las bajas temperaturas que se alcanzan a altitudes elevadas.

Además de las características de la tabla 2.6 también se miden, entre otros, curva de volatilidad, corrosión, punto de humo, estabilidad, contaminantes, conductividad, lubricidad, aditivos, etc.

Además del keroseno JET A-1, combustible utilizado para aviación civil, existen el keroseno JP-8 y JP-5, para uso militar. En la fig. 2.10 se observa un avión repostando keroseno.



Figura 2.12. Aeronave repostando keroseno. Fotografía de Kristoferb publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[12\]](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

FASES DEL TRANSPORTE

El transporte de mercancías es importante dentro de la industria debido a que permite mover dichas mercancías desde los lugares de obtención y/o producción hasta los lugares donde se demandan.

En el **transporte** de materias primas y/o productos existen las siguientes dos fases o momentos diferenciados (fig. 2.13):

- 1) Llevar las materias primas extraídas de pozos a las instalaciones de regasificación (refinerías de petróleo/regasificadoras, ver [Tema 3](#))
- 2) Distribuir los productos terminados al consumidor o centros de consumo

Entre las fases mencionadas toma gran importancia: EL **ALMACENAMIENTO** (apartado 2.3)



Figura 2.13. Esquema de la relación entre el transporte y almacenamiento de materias primas/productos. Imagen propia

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TIPOS DE TRANSPORTE

Los tipos de transporte más empleados para combustibles líquidos son:

1. Ferrocarril mediante el uso de **vagones cisterna**
2. Por carretera, mediante el empleo de **camiones**
3. Vía marítima, mediante **buques tanque**
4. Tuberías, en este caso concreto se denominan **oleoductos** o **poliductos**
5. 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 LÍQUIDOS

VAGONES CISTERNA

Inicialmente el petróleo se almacenaba en **barriles de madera** y se transportaban en estos contenedores en los vagones del tren. Posteriormente se comenzaron a usar trenes con vagones tipo tanque de acero (fig. 2.14)

Aunque la **aplicación principal** de los vagones cisterna es el **transporte interno** de productos derivados del petróleo, actualmente en pocos sitios se emplea el transporte de combustibles líquidos por ferrocarril. Concretamente, para este último caso, se suelen utilizar trenes de línea regular provistos de vagones-cisterna

Para este tipo de transporte pueden considerarse **distancias** típicas de **150-400 km** y **volúmenes** de **500-3000 tn/día**

Además, presentan rigidez asociada al origen-destino

Figura 2.14. Vagones cisterna. Fotografía publicada en Pxhere bajo licencia CC0 [\[13\]](#)



TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CAMIONES

El transporte por carretera juega un papel muy importante en la distribución de productos derivados del petróleo

Existen dos tipos de camiones:

- **De fines comunes:**

- Se emplean para transportar materias primas y productos que no tengan que ser transportados en camiones especiales o que no presenten algún tipo de peligrosidad

- **De fines específicos:**

- Se emplean cuando los camiones de fines comunes no se pueden usar (transporte de **combustibles líquidos** (fuelóleos, bitúmenes), **combustibles gaseosos** (GLP, GNL), productos peligrosos, ...)
- Por este motivo, este tipo de camiones necesitan un **diseño especial**

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CAMIONES

En función de la mercancía, los camiones anteriores pueden llevar la carga:

- **En bultos** (fig. 2.15). En este caso el camión sólo hace de transporte del recipiente de almacenamiento de la materia. Uso principal para gases comprimidos



Figura 2.15. Camión que transporta la carga en bultos. Fotografía publicada por Daniel Lobo en Flickr bajo licencia CC BY 2.0 [14]

- **En cisterna** (fig. 2.16). Este tipo de camiones transporta gases y líquidos sin envasar. Debido a esto, el propio camión hace las veces de transporte y almacenamiento. Este es el medio recomendable para **distancias <150 km** y **volúmenes <500 t/día**



Figura 2.16. Camión cisterna. Fotografía publicada por Lommer en Wikipedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [15]

- **A granel**. Normalmente la carga a transportar suele ser sólida sin envasar. Al igual que en el caso de las cisternas, el propio camión tiene la función de transporte y almacenamiento

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CAMIONES

Cuando la carga es mercancía peligrosa, tales como; combustibles líquidos o gaseosos (ver Tema 3), los camiones requieren un sistema de señalización especial en función de lo que transportan

Para el transporte de mercancías a granel/cisterna:

- **Producto único:** se incluye en la parte delantera/trasera del camión un panel naranja con número de identificación del peligro y producto (fig. 2.17)

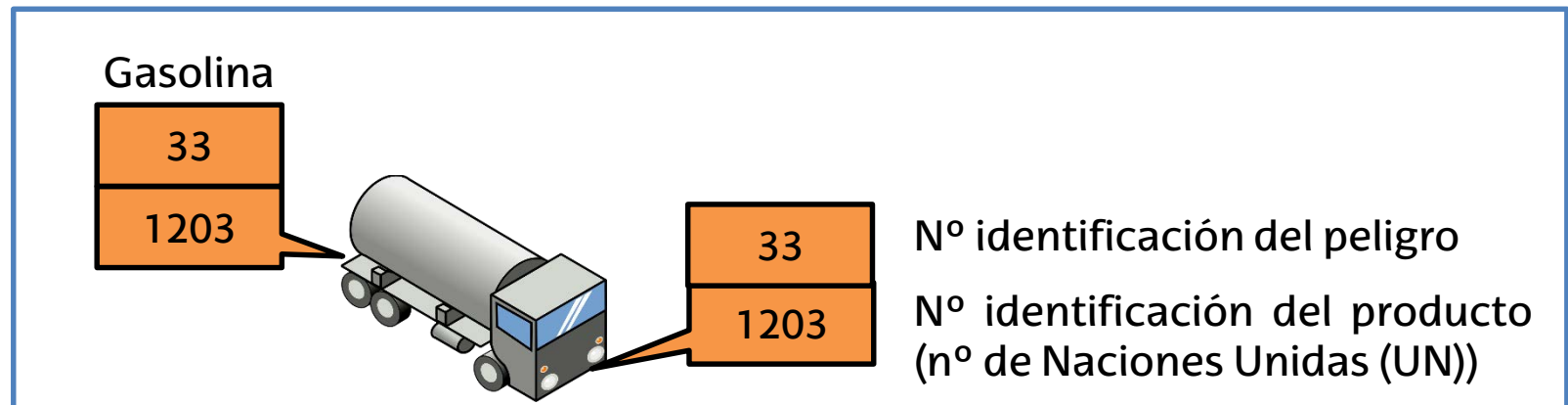


Figura 2.17. Señalización de un camión cisterna de mercancía peligrosa. Adaptación de la imagen publicada en Pixabay bajo licencia CC0 [\[16\]](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CAMIONES

Para el transporte de mercancías a **granel/cisterna**:

- **Varios productos:**
 - Se incluye en la parte delantera/trasera del camión paneles naranjas sin señal
 - En cada depósito de la cisterna se coloca un panel naranja con números de identificación
 - En el caso de hidrocarburos como; gasolina, gasóleo y keroseno:
 - ✓ se puede emplear la opción anterior (fig. 2.18)
 - ✓ se incluye panel naranja solo en la parte delantera/trasera indicando los datos de peligrosidad y número UN de la mercancía más peligrosa, en este caso concreto sería el de la gasolina

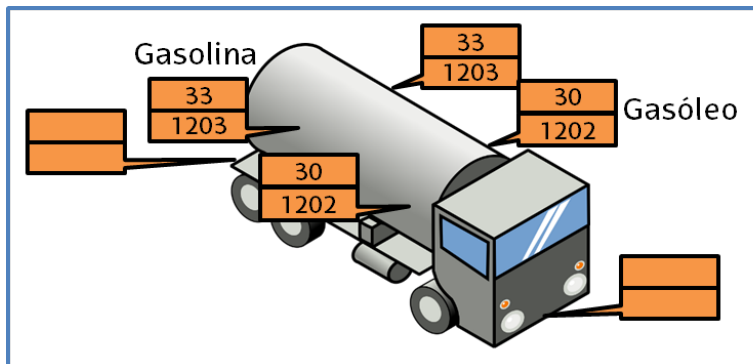


Figura 2.18. Señalización de un camión cisterna de mercancía peligrosa. Adaptación de la imagen publicada en Pixabay bajo licencia CC0 [17]

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

CAMIONES

Además del panel naranja, los camiones deben de disponer de una placa-etiqueta donde se indica la peligrosidad. Un ejemplo de alguna de estas placas se incluyen en la fig. 2.19.

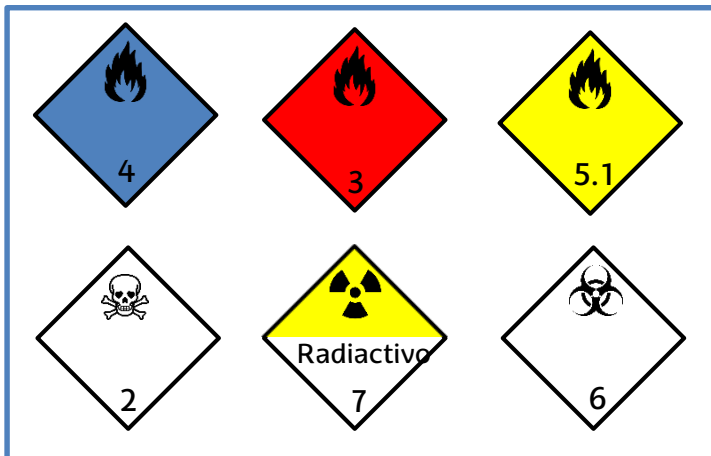


Figura 2.19. Ejemplo de placa-etiqueta.
Adaptación de las imágenes publicadas
en Pixabay bajo licencia CC0 y CC0 1.0

[\[18\]](#) [\[19\]](#) [\[20\]](#) [\[21\]](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BUQUES TANQUE

Los buques tanque (fig. 2.20) se emplean cuando:

- Las áreas de mercado están muy lejos, aproximadamente a **distancias >1000 km**

Asimismo, este tipo de barcos requieren de una infraestructura portuaria mínima y una alta capacidad de almacenamiento para la recepción

A los barcos que se emplean para transportar combustibles líquidos se les denomina:

- **Petrolero**, cuando la mercancía a transportar es petróleo
- **Livianero**, cuando la mercancía son derivados del petróleo, tales como: gasolinas, gasóleos, ...

Figura 2.20. Buque petrolero.
Fotografía publicada en Pixabay
bajo licencia CC0 [\[22\]](#)



TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BUQUES TANQUE

Los buques-tanque, con respecto a los barcos normales, presentan las siguientes **diferencias**:

- **Resistencia** estructural
- **Estanqueidad** de las materias primas/productos que transportan
- **Cambio de volumen** debido a la temperatura ambiental. Por cada 10 °C de incremento aumenta 1% el volumen. Debido a esto, los buques-tanque disponen de:
 - **Equipamiento específico** para cargar y descargar materias primas/productos (ej.: bombas)
 - **Aireación**, debido a que las materias primas/productos transportados pueden ser o contener compuestos volátiles que deben ser, en muchos casos, expulsados

Actualmente los buques de nueva construcción, debido a la legislación vigente del **Convenio Marpol**, deberán llevar protegidos los tanques de carga con tanques de lastre o espacios que no sean tanques de carga o combustible. Es decir, contarán con **dobles casco**. Opcionalmente se podrá plantear el proyecto del buque con cubierta intermedia.

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BUQUES TANQUE

En cuanto a las ventajas y desventajas de los buques-tanque (aplicable también para buques gaseros del Tema 3), éstas se presentan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ventajas y desventajas del uso de buques para el transporte de combustibles

VENTAJAS (hacen que sea la única alternativa de transporte)	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">- Capacidad de almacenaje: permiten trasladar mayor cantidad de mercancía que los camiones y ferrocarriles- Fletes (precio del transporte): muy competitivos y baratos- Estabilidad: en función de las condiciones climáticas, un barco tiene mayor margen de maniobrabilidad que un avión- Flexibilidad de materias transportables: el transporte marítimo a veces es la única opción para transportar mercancías peligrosas	<ul style="list-style-type: none">- Falta de accesibilidad de los puertos: posible falta de infraestructuras adecuadas en países lejanos- Frecuencia de los trayectos: los buques necesitan más tiempo para acondicionarse y hacerse a la mar- Escasa velocidad: lento

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BUQUES-TANQUE

Los **tipos** de buques-tanque para combustibles líquidos son los que aparecen en la fig. 2.21:

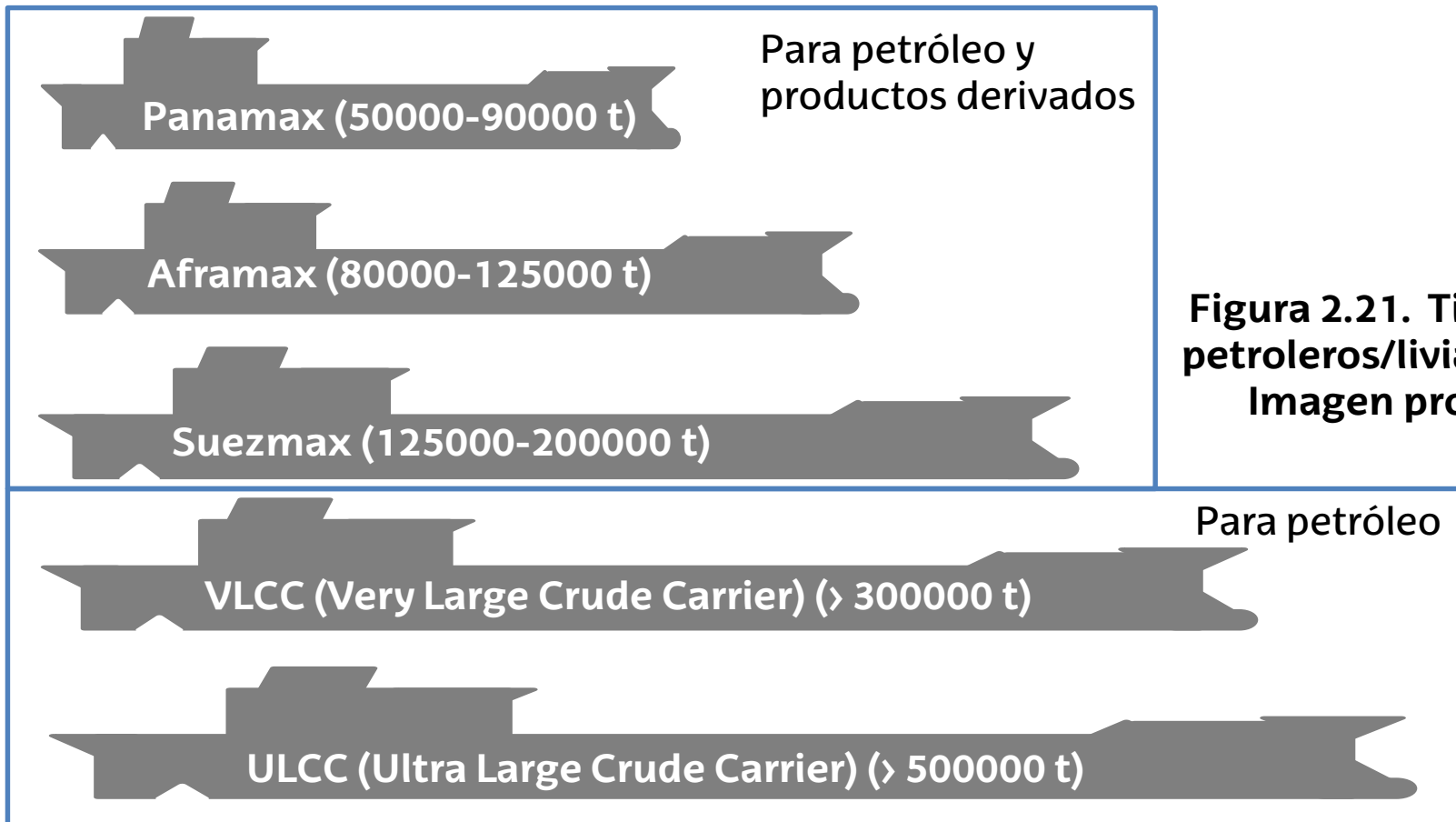


Figura 2.21. Tipos de petroleros/livianeros. Imagen propia

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

BUQUES TANQUE

En cuanto a la estructura de los tanques, estos pueden presentar (figs. 2.22 y 2.23):

- Único casco y fondo
- Único casco y doble fondo
- Doble casco y fondo (estructura comúnmente empleada)
 - Doble casco: como protección de los tanques de carga
 - Doble fondo: sirve como barrera a la salida de producto al mar

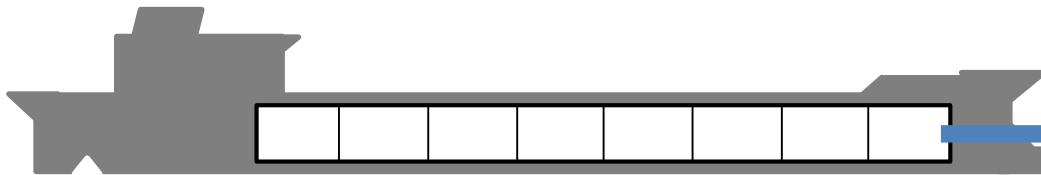
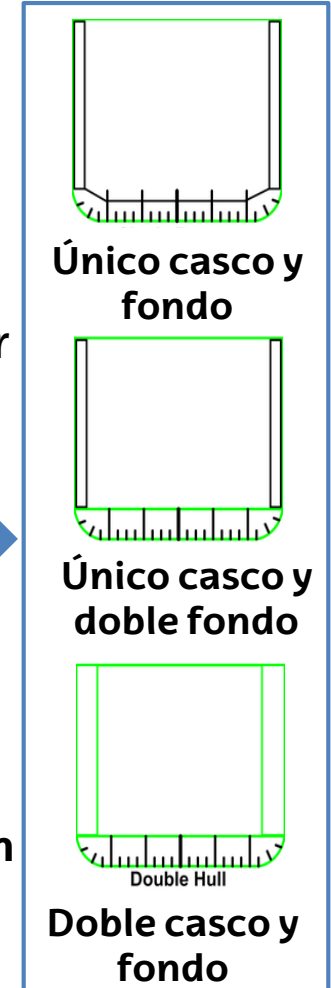


Figura 2.22. Situación de los tanques en un buque de combustibles líquidos. Imagen propia

Figura 2.23. Estructura de los tanques. Adaptación de la imagen publicada en Wikipedia por George William Herbert bajo licencia CC BY-SA 2.5 [23]



TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TUBERÍAS

Es el tipo de transporte de combustibles líquidos y gaseosos más seguro, y en cuanto al coste, es uno de los más económicos

Las tuberías al igual que los buques, en función de la materia a transportar se denominan:

- **Oleoductos**, para petróleo principalmente
- **Poliductos**, para derivados líquidos del petróleo (gasolinas, gasóleo, ...)
- **Gasoductos**, para gases comprimidos (transporte en fase gas) (ver [Tema 3](#))

En función de la localización se clasifican en gasoductos:

- **"Onshore" (tierra o enterrado)** (figs. 2.24 y 2.25)

Figura 2.24. Oleoducto aéreo del sistema de oleoductos Trans-Alaska. Fotografía publicada en Wikimedia por Luca Galluzi bajo licencia CC BY-SA 2.5 [\[24\]](#)



- **"Offshore" (mar)**

Figura 2.25. Señalización de un oleoducto enterrado. Fotografía de Allpe publicada en Wikipedia bajo licencia CC BY 3.0 [\[25\]](#)



TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TUBERÍAS

Las **diferencias** más importantes de una tubería “offshore” con respecto a un “onshore” son las siguientes:

- Las tensiones que se generan son mayores, por estar construidos bajo el mar
- Se puede producir la flotación, principalmente durante la construcción
- Los trabajos de reparación son complicados y caros, debido a que el personal que realiza estas labores además de ser profesionales del ámbito deben ser submarinistas
- El clima desfavorable puede provocar la parada de la construcción de la tubería
- Durante el periodo de construcción son necesarios aparatos con control remoto

Por estos motivos **se prefieren** las **tuberías onshore**.

Asimismo, las tuberías se adecuan a la legislación correspondiente y requieren un sistema de señalización en función del uso, tamaño, localización y combustible transportado.

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

TUBERÍAS

Las ventajas y desventajas de este tipo de transporte se recogen en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Ventajas y desventajas del uso de tuberías

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">– Transporte más seguro y económico– Evita tráfico y contaminación ambiental– Transporte de grandes cantidades de combustibles– Transporte de diferentes productos sin mezcla de éstos– Falta de peso muerto. El vehículo es al mismo tiempo la vía– Escaso consumo de energía y trazado sensiblemente recto– Indiferencia a la meteorología	<ul style="list-style-type: none">– Falta de adaptación a puntas de consumo– Dificultad en el transporte de productos viscosos– Inversión elevada

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

OLEODUCTOS

Las **características** principales de un oleoducto son:

- Gran diámetro y longitud. Ejemplos:
 - Diámetro de tuberías de transporte: 42-28" (1-1,20 m)
 - Diámetro de tuberías de distribución: 18-22" (40-70 cm)
- Los oleoductos pueden estar conectados entre si creando un **sistema o red de oleoductos** (nacional, internacional, ...)

En cuanto a la **construcción y operación**:

- Los materiales más empleados son acero para trabajar a presiones altas
- En espacios desarrollados, urbanos, y de flora sensible se construyen enterrados
- Se debe realizar evaluación de: ingeniería mecánica e impacto ambiental
- Para el transporte son necesarias estaciones de bombeo que mantienen el movimiento de combustible líquido (habitualmente $v = 1-2$ m/s)
- Durante el camino se establecen instalaciones de distribución, bombeo y de eliminación de aire
- Construcción basada en la especificación API (American Petroleum Institute) 5L y 5LX

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE OLEODUCTOS

Una red de oleoductos, o poliductos, se compone además de por la propia tubería, de más elementos: estaciones de bombeo, válvulas de regulación de caudal y seguridad, parques de almacenamiento (apartado 2.3) y terminales, tal y como se muestra en la fig. 2.26.

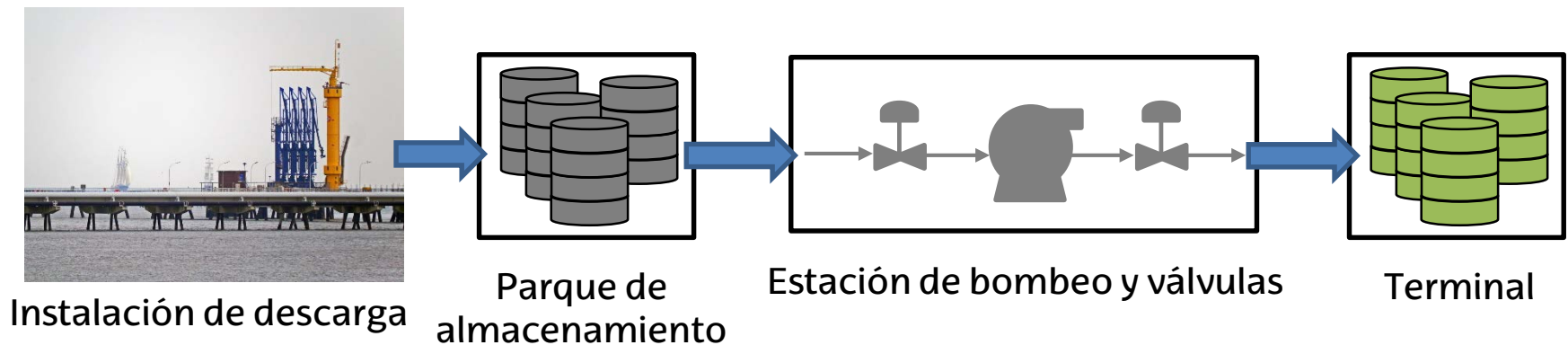


Figura 2.26. Esquema de la estructura de una red de oleoductos. Imagen adaptada de la fotografía publicada en Pixabay bajo licencia CC0 [\[26\]](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE OLEODUCTOS

Las **estaciones de bombeo** constan de tres subestaciones: estación para el aumento de presión, estación principal de bombeo y estaciones de bombeo intermedias

- **Estación para aumentar la presión**, también denominada **booster** o **bombas de presión**. Su finalidad es comprobar que el producto llega a la estación de bombeo principal desde el tanque de almacenamiento (0-1 bar) con presión suficiente (3-5 bar), es decir, que permiten vencer las pérdidas de carga que generan los elementos situados antes de las bombas principales

Los **elementos principales** son:

- **Bombas**: en paralelo y siempre con un grupo de reserva
- **Equipamiento de protección**: presostatos (son interruptores eléctricos de presión que abren o cierran en función de la presión medida asegurando la presión requerida) y sondas de medición de la temperatura

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE OLEODUCTOS

- **Estación de bombeo principal**, el componente llega de la estación de aumento de presión con una presión adecuada

Los **circuitos** más importantes que componen esta estación son:

- **Circuito de aspiración**: empleado para la eliminación de sólidos y agua. Para ello se emplea un equipamiento específico, como por ejemplo: turbidímetro, densímetro, ..., banco de mediciones, etc.
- **Circuito de bombeo**: normalmente ubicado después del circuito de aspiración. Este circuito está compuesto por bombas y equipamiento de protección
- **Circuito de impulso**: se encarga de la regulación y distribución
- **Circuito de purga/drenaje**: su función es la extracción y almacenamiento de la materia prima/producto

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ESTRUCTURA DE UNA RED DE OLEODUCTOS

- Estaciones de bombeo intermedias, cuya finalidad es mantener el caudal para evitar el gradiente hidráulico (fig. 2.27) generado por rozamiento

Otros elementos principales en este tipo de subestaciones son:

- Banco de medición, para contabilizar la cantidad de producto entregado
- Punto de recogida de muestras de producto a entregar
- Tanques de almacenamiento de productos

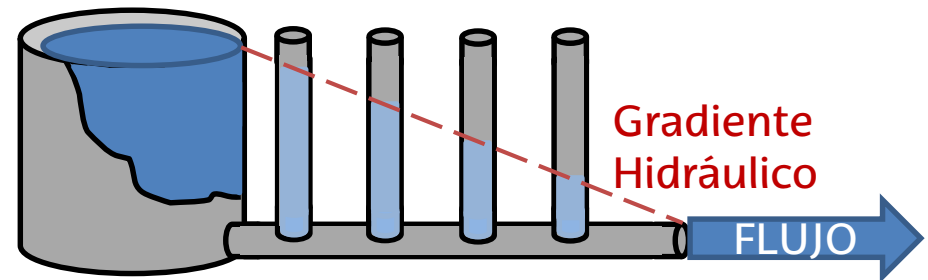


Figura 2.27. Evolución del gradiente hidráulico en una tubería. Imagen propia

Las estaciones terminales, son estaciones que están situadas en el punto o destino final, y que constan de elementos como válvulas y tanques.

Los circuitos principales son:

- Circuito de llegada
- Circuito de purga y drenaje

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

POLIDUCTOS

Los **poliductos** (fig. 2.28) se emplean para transportar **combustibles terminados** generados en refinerías (diferentes grados de nafta, keroseno para aviación, gasóleo, fuelóleo y keroseno de uso doméstico) a los centros de distribución

Los poliductos pueden transportar **muchos productos** terminados, realizando el transporte de éstos en paquetes continuos denominados “**branche**”

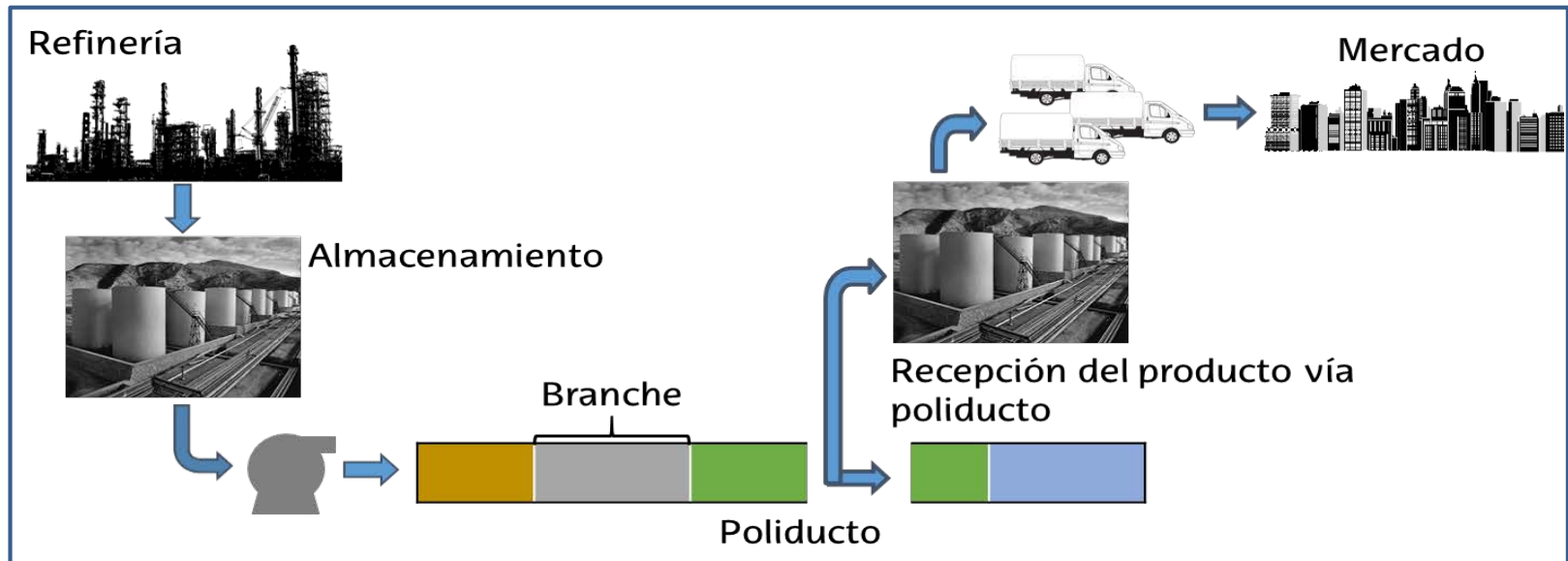


Figura 2.28. Esquema del uso de un poliducto. Imagen adaptada de las fotografías publicadas en Pixabay bajo licencia CC0 [27], [28], [29] y Flickr por Jesus Láinez bajo licencia CC BY-NC-SA 2.0 [30]

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

POLIDUCTOS

El transporte de diferentes combustibles al mismo tiempo mediante un poliducto se realiza manteniendo una **secuencia/orden de productos concreto** (fig. 2.29) para **favorecer la separación** de éstos y **evitar cambios de calidad/propiedades** de los mismos

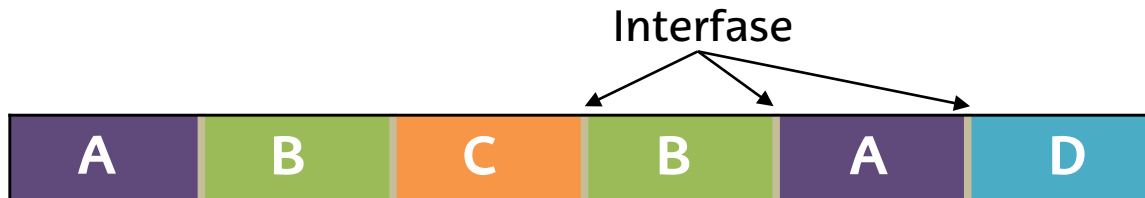


Figura 2.29. Formación de las interfaces entre productos en un poliducto. Imagen propia

Las **interfaces** se tratan de dos formas teniendo en cuenta si:

- La **mezcla es compatible**. Entonces ésta se añade a productos comerciales
- Son restos. Éstos se separan y se envían a tanques donde son tratados/recuperados

La **detección** de las interfaces se realiza principalmente por **densidad** (densímetro), cuando las densidades son diferentes. En caso de que sean similares se emplean analizadores ópticos que miden la absorción de la luz

Detectadas las interfaces, los combustibles se separan y se envían a los tanques

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS

El objetivo del diseño, y por tanto del dimensionamiento, es definir o **calcular** el **diámetro** y **espesor** de la **tubería** y **conocer** las **características** de las **operaciones** (velocidad, caudal, bombeo, ...)

Para realizar un dimensionamiento adecuado es necesario conocer o establecer las siguientes características:

- Capacidad de transporte, definida como la cantidad por año a transportar mediante la tubería. Las unidades de este parámetro para oleoductos es: tn/año
- Coeficiente de utilización de la tubería (C_u), que son número de horas de funcionamiento de la tubería/número totales horas del año
 - Normalmente, el valor de este parámetro es de 8.400 h/año en funcionamiento, equivalente a una parada de 15 días al año, dando lugar a un factor de utilización de 95,8%

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS

- Características físico-químicas de los productos a transportar:
 - Oleoducto: viscosidad, peso específico, presión de vapor y sus cambios con la variación de temperatura
- Perfil altimétrico del trazado (principalmente para oleoducto), para lo cual, en un primer cálculo, sería necesario conocer la altitud del punto inicial y final de la tubería, la pendiente y las elevaciones
- Características físico-químicas del terreno, que solo tienen sentido a la hora de establecer el sistema de protección contra la corrosión
- Temperatura de transporte en caso de que haya variaciones importantes de esta variable, porque puede variar el estado del fluido a transportar y por tanto sus características físico-químicas

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍAS

En definitiva, para el dimensionamiento de una tubería (fig. 2.30) se tendrán en cuenta:

- Las características de la tubería
- Las características físico-químicas del fluido a transportar
- La relación entre las características de la tubería y el fluido
- Las pérdidas de presión/carga a lo largo de la tubería

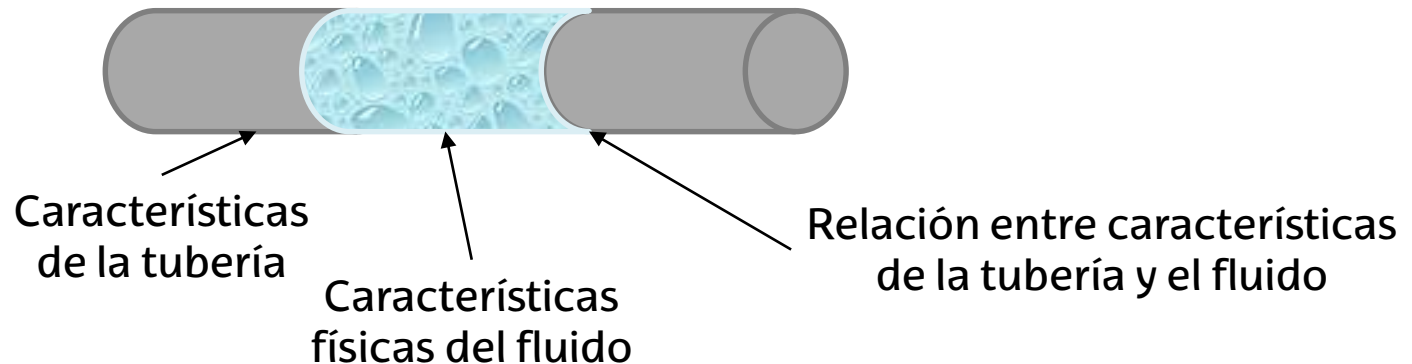


Figura 2.30. Esquema de una tubería que transporta un fluido. Imagen propia

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

- Características de la tubería. Éstas se refieren principalmente al **diámetro interno (D)** y **espesor (e)** de la tubería. Ambos parámetros se calculan mediante las siguientes ecuaciones matemáticas:

Primera aproximación para el cálculo del **diámetro interior**:

$$D = 18,8 \sqrt{\frac{Q}{v}}$$

- D = diámetro interno (mm)
- Q = caudal (m³/h)
- v = velocidad (comprendida entre 1-2 m/s)

Cálculo del **espesor**:

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot S \cdot a}$$

- e = espesor (mm)
- P = presión máx. de trabajo (kg/cm²)
- D_e = diámetro exterior (mm)
- S = 0,72 · E (donde E es límite elástico del material (kg/cm²))
- a = coeficiente según procedimiento de fabricación de la tubería (API5L, API5LX, ..)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

- **Características físicas** del fluido. Las características físicas más importantes de los líquidos a transportar por un oleoducto son:
 - **Viscosidad.** Hace referencia a la resistencia de un fluido a fluir. Es importante para el cálculo del tamaño de línea y la potencia de bombeo
 - **Densidad específica.** Se conoce así a la relación de masa/volumen
 - **Presión de vapor.** Relacionada con la presión de la fase gaseosa del gas en equilibrio con la fase gas de un sólido o un líquido a una temperatura determinada. Es importante cuando se transportan líquidos volátiles, ya que se requiere mantener una presión suficiente para mantener los líquidos en estado líquido
 - **Punto de fluidez.** Es la temperatura más baja a la que el líquido es capaz de fluir
 - **Compresibilidad.** Se denomina al cambio de volumen con el cambio de presión
 - **Temperatura.** Esta magnitud influye sobre la densidad y viscosidad del fluido

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

- **Relación** entre las **características** de la tubería y el fluido. El diámetro de la tubería, la viscosidad del fluido y el flujo influyen sobre la velocidad y el régimen del flujo (fig. 2.31), siendo éste último:
 - **Laminar** ($Re < 2000$)
 - ✓ Se produce cuando el gradiente de velocidad es bajo. Da lugar a una fuerza de fricción baja, que hace que las partículas no roten o si lo hacen, con muy poca energía
 - ✓ El resultado es un movimiento de las partículas del fluido en la misma trayectoria
 - **Turbulento** ($Re \geq 4000$)
 - ✓ La acción de la viscosidad es despreciable, dando lugar a que las partículas del fluido tengan energía de rotación y se mueven en forma errática chocando unas con otras
 - ✓ El resultado es que las partículas del fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas
 - Para valores de Re entre **2000** y **4000** se dice que el fluido se encuentra en un **régimen de transición** o **crítico**

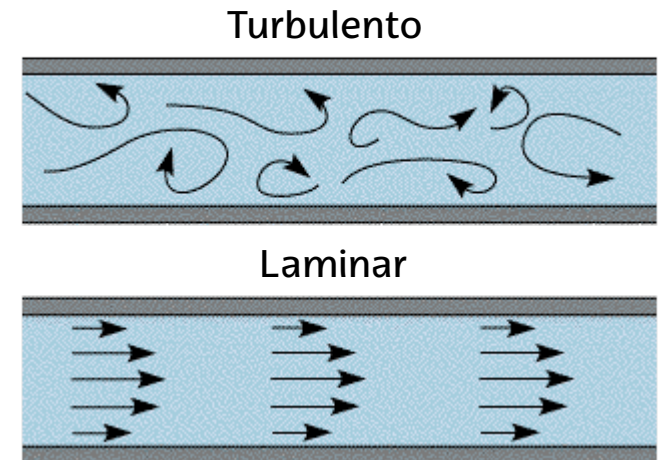


Figura 2.31. Esquema de los tipos de régimen de un fluido.
Imagen de Lucho w2ed publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [\[31\]](#)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

Para determinar el tipo de régimen del fluido se emplea el **número de Reynolds (Re)**. Habitualmente, en oleoductos el régimen es turbulento

El cálculo del **número de Reynolds (Re)** se calcula como sigue:

$$\text{Re} = \frac{D \cdot v}{\nu}$$

$\left\{ \begin{array}{l} D = \text{diámetro interno del tubo (m)} \\ v = \text{velocidad del flujo (m/s)} \\ \nu = \text{viscosidad (m}^2/\text{s)} \end{array} \right.$

En el caso de **oleoductos**, la expresión para el cálculo de **Re** puede definirse como sigue en base al caudal:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

$\left\{ \begin{array}{l} A = \text{área del tubo (m}^2) \\ Q = \text{caudal (m}^3/\text{h)} \\ D = \text{diámetro interno (m)} \end{array} \right.$

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

$\left\{ \begin{array}{l} D = \text{diámetro interno del tubo (m)} \\ Q = \text{caudal (m}^3/\text{h)} \\ \nu = \text{viscosidad cinemática (cSt= mm}^2/\text{s)} \end{array} \right.$

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

Asimismo, otro aspecto a tener en cuenta en esta relación entre la tubería y el fluido es el **factor de fricción (f)**. Aunque existen diversas fórmulas para determinar este parámetro, la más empleada es la **fórmula de Colebrook**

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

f = factor de fricción (adimensional)
 ε = rugosidad absoluta de la tubería (m)
 D = diámetro interno (m)
 Re = número de Reynolds (adimensional)

ε/D = rugosidad relativa

Aunque el cálculo del **factor de fricción** también se puede realizar de forma gráfica mediante el **diagrama de Moody**

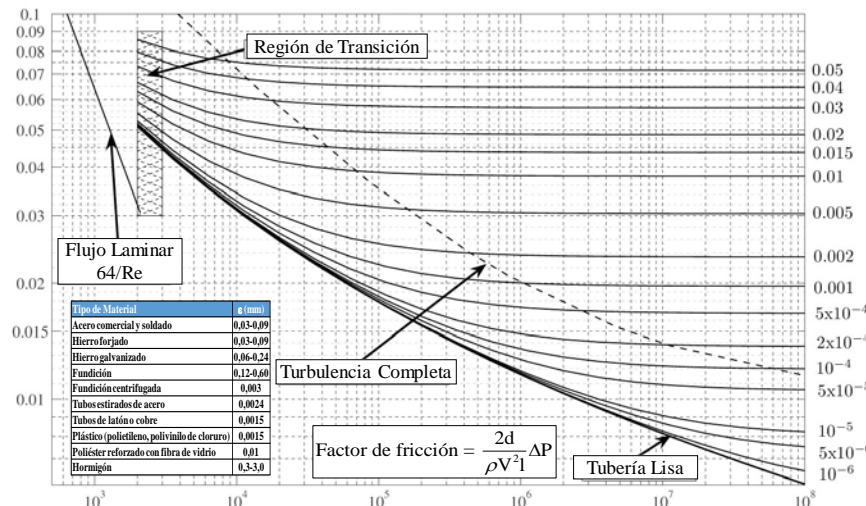


Figura 2.32. Diagrama de Moody. Imagen adaptada de S. Beck y R. Collins de la "University of Sheffield" publicada en Wikimedia bajo licencia CC BY-SA 3.0 [32]

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

En la tabla 2.9, incluida en la fig. 2.32, se presentan intervalos de **rugosidad absoluta** de diferentes materiales.

Tabla 2.9. Valores de rugosidad absoluta (ε) de diferentes materiales. Adaptación de la información publicada en [33]

Tipo de Material	ε (mm)
Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Hierro forjado	0,03-0,09
Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición	0,12-0,60
Fundición centrifugada	0,003
Tubos estirados de acero	0,0024
Tubos de latón o cobre	0,0015
Plástico (polietileno, polivinilo de cloruro)	0,0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01
Hormigón	0,3-3,0

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

- **Pérdida de carga** en la tubería. Se genera debido a la fricción entre las partículas del fluido y las paredes de la tubería (**pérdida de presión por rozamiento**) en una longitud de tubería

Teniendo en cuenta que los oleoductos trabajan en régimen turbulento, el cálculo de la pérdida de carga por rozamiento se calcula mediante la **ecuación de Darcy-Weisbach** (para tubos de flujo permanente y diámetro constante):

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g}$$

h_f = pérdida carga en cabeza de tubo por rozamiento (m de columna de líquido)
 f = factor de rozamiento ; L = longitud del tubo (m)
 v = velocidad de flujo del fluido (m/s) ; D = diámetro interno del tubo (m)
 g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Teniendo en cuenta que la velocidad del fluido es el cociente entre el caudal y el diámetro interno de la tubería, la ecuación anterior se utiliza frecuentemente en función del caudal, tal y como sigue:

$$h_f = 6395 \cdot 10^6 \cdot f \cdot L \frac{Q^2}{D^5}$$

L = longitud del tubo (km) ; f = factor de rozamiento
 Q = caudal (m³/h)
 D = diámetro interno del tubo (mm)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

- **Presión de descarga** en la tubería. Este parámetro se asocia a la ecuación de energía de estado estable (**ecuación de Bernoulli**), que compara la energía de un líquido en dos puntos diferentes (**perfil altimétrico**), tomando como referencia el punto de origen.

Tal y como se observa, el uso de esta ecuación requiere conocer valores teóricos de flujo, velocidad de flujo, pérdida de presión por rozamiento o condiciones de una bomba para mantener un flujo estable.

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + Z_A + H_p = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2 \cdot g} + Z_B + h_f$$

P = presión (kN/m²)

γ = peso específico (kN/m³) $\longrightarrow \gamma = \delta \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot g \text{ (m/s}^2\text{)} = \text{N/m}^3 = 10^{-3} \text{ kN/m}^3$

v = velocidad (m/s)

D = diámetro interno del tubo (m)

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Z = altura desde el nivel de referencia (m)

H_p = altura relacionada con bombas (m.c.l)

h_f = pérdida carga por rozamiento (m.c.l)

TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

DIMENSIONAMIENTO DE OLEODUCTOS

En las ecuaciones anteriores aparece un término denominado H_p y que está relacionado con las posibles bombas que tendría el sistema de tuberías para evitar el gradiente hidráulico.

Conocido este dato es posible calcular la **potencia** necesaria del sistema de bombeo mediante la siguiente ecuación matemática:

$$P_h = \frac{\delta \cdot Q \cdot H_p}{75 \cdot 3600 \cdot \eta}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_h = \text{potencia absorbida (CV)} \\ Q = \text{caudal (m}^3/\text{h)} \\ \delta = \text{densidad (kg/m}^3\text{)} \\ H_p = \text{altura relacionada con bombas (m.c.l)} \\ \eta = \text{rendimiento total de la bomba} \end{array} \right.$$

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

¿Porqué se hace necesario el almacenamiento de combustibles?

Porque el almacenamiento puede dar respuesta a situaciones de:

- Discontinuidad en el aprovisionamiento, abastecimiento y/o suministro
- Desabastecimiento por fallo en la instalación de tratamiento o en el propio transporte
- Aumento del consumo en "horas puntas" o en diferentes estaciones del año. Como ejemplo cabe citar la mayor demanda de combustibles para calefacción en épocas invernales que en verano

Asimismo, el almacenamiento:

- Permite la sedimentación de agua y de barros del crudo antes del transporte o destilación
- Proporciona flexibilidad operativa a las refinerías/regasificadoras ([Tema 3](#))

La [normativa](#) sobre almacenamiento de combustibles líquidos aparece como una [instrucción técnica complementaria \(IT-MI-IP-02\)](#) dentro de la [Normativa de Refinerías del Petróleo \(Real Decreto 1523/1999\)](#)

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Se define el sistema de almacenamiento como el conjunto de recipientes de todo tipo que contengan o puedan contener líquidos inflamables y/o combustibles, ubicados en un área que incluye los tanques/depósitos, sus cubetos de retención, las tuberías de conexión y las zonas e instalaciones de carga y descarga

En el caso de combustibles líquidos, el almacenamiento se realiza en **tanques**. En función de la construcción, éstos se clasifican de la siguiente manera:

- **Vertical**: muy utilizados, dada su gran capacidad (10-20000 m³). Pueden ser de:
 - **Techo fijo** (oxigenación y humedad)
 - **Techo flotante** (reducir emisiones atmosféricas por presencia de volátiles)
 - **Techo fijo con pantalla flotante interna**
- **Horizontal** (también denominados cigarros): para productos derivados del petróleo a presión atmosférica o ligeramente superior a ésta
- **Esférico**: para **gases licuados del petróleo** (GLP) a presión atmosférica (ver Tema 3)

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Al igual que los depósitos, en función de la localización, los tanques pueden ser aéreos (de superficie), semienterrados o enterrados (ver Tema 3).

En el caso de combustibles líquidos, los tanques más empleados son los verticales (cuando se trata de grandes cantidades)

Asimismo, estos tanques presentan diferentes ventajas y desventajas

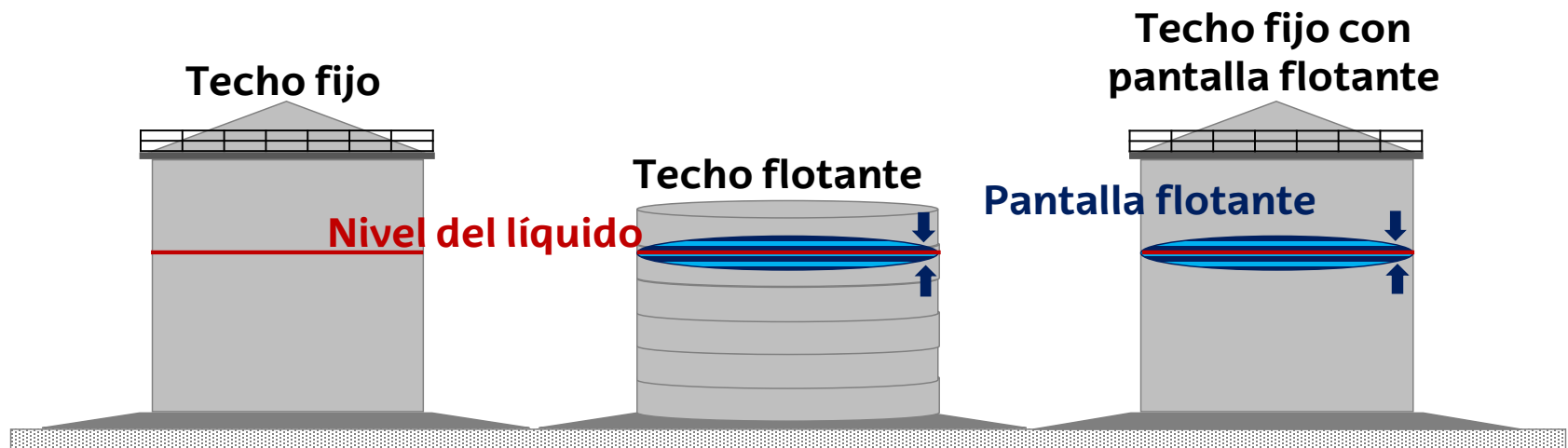


Figura 2.33. Tipos de tanques verticales. Imagen propia

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

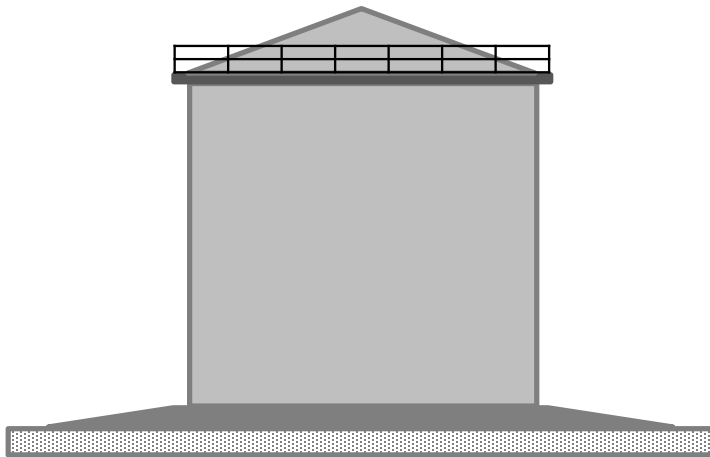


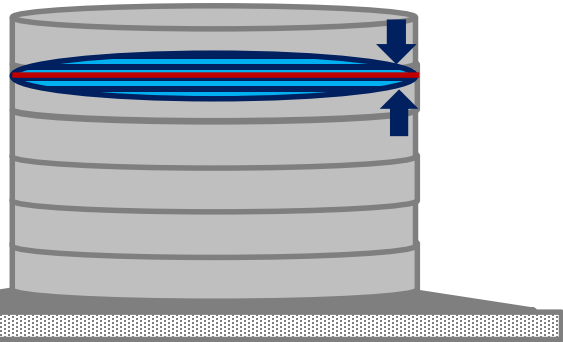
Figura 2.34. Tanque vertical con techo fijo. Imagen propia

Las **ventajas/desventajas** de un tanque vertical de **techo fijo** son:

- Menor coste que los de techo flotante
- No soportan la carga del agua de lluvia
- No hay posibilidad de inundación por agua de lluvia
- Las tolerancias de fabricación pueden ser mayores
- Podrían contener productos a presión distinta a la atmosférica
- Más adecuado para pequeñas dimensiones
- Normalmente empleados para derivados del petróleo tales como, gasóleo y fuelóleo

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO



**Figura 2.35. Tanque vertical con techo flotante (movimiento arriba y abajo en función del nivel del líquido almacenado).
Imagen propia**

Las **ventajas/desventajas** de un tanque vertical de **techo flotante** son:

- Menores pérdidas por evaporación causadas por la variación de la temperatura
- Durante el llenado los vapores no deben ser evacuados porque no existe espacio entre el líquido y el techo flotante donde quedan retenidos
- Reduce el riesgo de incendio porque no existe aire en contacto con el líquido
- La falta de espacio entre el líquido y el techo imposibilita la presencia de mezclas explosivas (combustible + aire)
- Normalmente se emplean para crudos en grandes capacidades

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

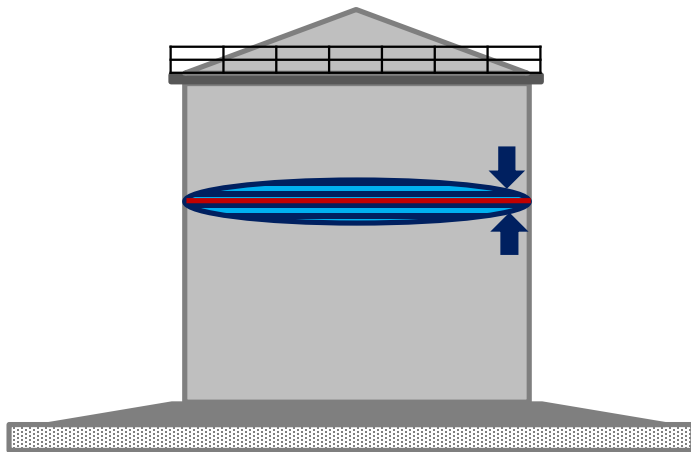


Figura 2.36. Tanque vertical de techo fijo con pantalla flotante (movimiento arriba y abajo en función del nivel del líquido almacenado). Imagen propia

Las **ventajas/desventajas** de un tanque vertical de **techo fijo con pantalla flotante** son la combinación de los dos anteriores:

- Menores pérdidas por evaporación causadas por la variación de la temperatura
- Durante el llenado los vapores no deben ser evacuados porque se evita la presencia de espacio entre el líquido y el techo flotante donde quedan retenidos
- Reduce el riesgo de incendio por no haber aire en contacto con el líquido
- La falta de espacio entre el líquido y el techo impide la formación de mezclas explosivas (combustible + aire)
- No deben soportar ni la carga ni la inundación por presencia de agua de lluvia
- Normalmente se emplean para gasolinas, keroseno, etanol, MTBE, etc

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

De forma generalizada, los tanques para almacenamiento de combustibles, que contienen el mismo producto o que son del mismo subtipo, se disponen en **parques de almacenamiento**

En estos parques de almacenamiento, la distancia entre tanques (**establecida en el [Real Decreto 1523/1999](#)**) es un aspecto muy importante, siendo ésta función de los siguientes factores:

- Diámetro del tanque más grande o del que requiere mayor espacio
- Tipo de tanque
- Tipo de producto
- Presencia de cubeto (el mismo para diferentes tanques o diferente)
- Nivel de las medidas de protección contra incendios

Para combustibles tipo gasolinas, gasóleos, fuelóleos, etc., los tanques verticales no se disponen en más de 2 filas, porque es necesario dejar un paso para casos de incendio

Asimismo, existen instalaciones mixtas compuestas por tanques verticales y horizontales

NORMATIVA Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO

Asimismo, existen **instalaciones mixtas** compuestas por tanques verticales y horizontales

La distancia entre tanques en este tipo de instalaciones, al igual que ocurre en parques de almacenamiento, se establece en la [instrucción técnica complementaria \(IT-MI-IP-02\)](#)

En cuanto a la capacidad de los tanques, ésta puede ser:

- **Capacidad nominal.** Hace referencia a la capacidad que se especifica en plano o documentación
- **Capacidad geométrica.** Se asocia al volumen geométrico calculado para el tanque, teniendo en cuenta la dimensión real de la construcción
- **Capacidad útil.** Es la capacidad que se emplea en las operaciones de llenado y vaciado
- **Capacidad calibrada.** Establece la relación entre volumen real y el nivel que tiene el líquido almacenado (tablas de capacidad del tanque). Suele ser menor que la geométrica

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ELEMENTOS BÁSICOS

Todos los tanques/depósitos presentan **elementos**: de telemedición, boca de sondeo, pasos de hombre, bocas de limpieza, base hormigón, instalación contra incendios, calefacción, agitadores

Asimismo los parques de almacenamiento suelen estar provistos de **cargaderos** y **cubetos de retención** ([instrucción técnica complementaria \(IT-MI-IP-02\)](#))

Existen dos tipos de **cargaderos**:

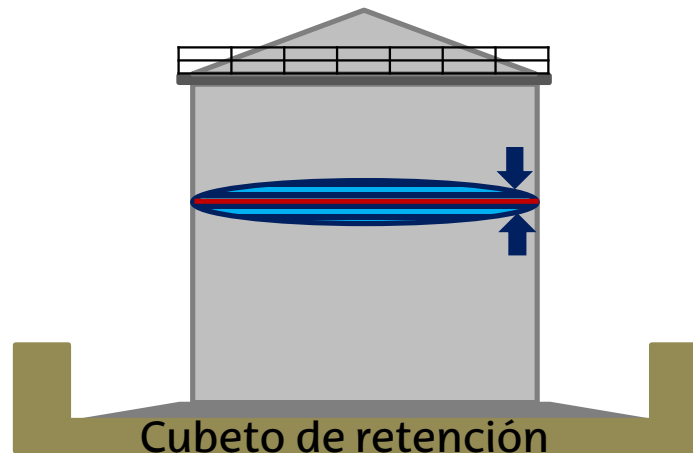
- **Terrestres**. Son sitios específicos para cargar y descargar camiones y vagones cisterna. Necesitan equipos específicos de bombeo para el trasvase de productos
- **Marítimos**. Instalaciones adecuadas que permiten la carga y descarga de buques-tanque de productos petrolíferos mediante mangueras y tuberías

ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ELEMENTOS BÁSICOS

Los **cubetos de retención** son recipientes estancos cuya función es la recogida de posibles derrames durante las operaciones de llenado y vaciado, o mal funcionamiento de la planta

Los **tanques aéreos** deben disponer de cubeto de retención



**Figura 2.37. Tanque aéreo vertical con cubeto de retención.
Imagen propia**