



Monografía 17

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería

*Energy consumption and emissions associated with
transportation by pipeline*

Manuel Cegarra Plané

Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería

Energy consumption and emissions associated with transportation by pipeline

Manuel Cegarra Plané

Fundación Agustín de Betancourt

<http://www.enertrans.es>

© Manuel Cegarra Plané

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto EnerTrans, 2008

ISBN: 978-84-89649-50-7

Depósito Legal: M-13505-2009

Esta monografía ha sido redactada por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación “*Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte*”(EnerTrans).

El proyecto *EnerTrans* ha sido desarrollado por los siguientes organismos: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA; Universidad de Castilla-La Mancha; ALSA; Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid; Fundación “Agustín de Betancourt”; Fundación Universidad de Oviedo.

El proyecto *EnerTrans* contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).

El proyecto *EnerTrans* estuvo dirigido por su investigador principal Alberto García Álvarez con el apoyo de un “Comité Científico” del que formaron parte las siguientes personas: Alberto García Álvarez (Fundación de los Ferrocarriles Españoles); Ignacio Pérez Arriaga y Eduardo Pilo de la Fuente (Universidad Pontificia Comillas de Madrid); Jose María López Martínez (Universidad Politécnica de Madrid-INSIA); Alberto Cillero Hernández y Carlos Acha Ledesma (ALSA); Timoteo Martínez Aguado y Aurora Ruiz Rúa (Universidad de Castilla-La Mancha); José Miguel Rodríguez Antón y Luis Rubio Andrada (Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid); Manuel Cegarra Plané (Fundación “Agustín de Betancourt”) y Rosa Isabel Aza y José Francisco Baños Pino (Fundación Universidad de Oviedo). El coordinador del proyecto por parte del CEDEX fue Antonio Sánchez Trujillano.

The aim of the EnerTrans research project is to obtain an accurate model to find out the energy consumption (and associated emissions) of the Spanish transport system, according to the important variables on which it depends, and thereby avoid the need to extrapolate historical data series calculated with various methodologies in the European sphere for each mode of transport. The participants include various universities and foundations linked to different modes of transport: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, Fundación Agustín de Betancourt and Fundación Universidad de Oviedo.

The project has involved constructing a model which can be used to explain and predict energy consumption (and associated emissions) in the Spanish transport system, using a coherent methodology for all modes, considering all energy utilizations (construction, operation, maintenance, movement) and the whole energy cycle from source to final use, thus allowing the effects of the results of infrastructure or transport policy to be anticipated and evaluated. As a secondary objective, the project will permit assessment of the impact of any type of technical or operational measure aimed at reducing this energy consumption, which will be useful for transport operators.

It includes innovations such as taking into consideration different routes between the same points for each one of the different modes of transport, or separating consumption from load or space utilization coefficients.

The published documents corresponding to the EnerTrans project fall into three categories: Monographs, Articles and Technical notes.



Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2006-006-01ASM.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Conceptos básicos del transporte por tubería	6
1.2. La tubería y los otros modos de transporte	7
1.3. Situación de la red de transporte por tubería	8
1.4. Magnitudes del transporte y consumos energéticos	9
2. TRANSPORTE POR TUBERÍA Y LA ENERGÍA	11
2.1. Resistencias al avance	12
2.2. Movimiento del fluido en la tubería	13
3. ENERGÍA CONSUMIDA EN EL TRANSPORTE DE LÍQUIDOS POR TUBERÍA (OLEODUCTOS)	14
4. ENERGÍA CONSUMIDA EN EL TRANSPORTE DE GASES POR TUBERÍA (GASODUCTOS)	17
4.1. Cálculo del consumo de energía	18
4.2. Resumen del resultado del procedimiento de cálculo	21
BIBLIOGRAFIA	23

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina genericamente “transporte or tubería” al transporte de líquidos o gases por conducciones sin uso de vehículos especiales.

La importancia creciente (en longitud y diámetro) de las líneas y redes de tuberías (oleoductos, gasoductos y tuberías de transporte de otros fluidos) se ve favorecida por la aplicación de muy diversas tecnologías innovadoras: materiales de última generación como los plásticos modernos y los aceros de alta resistencia, distancias de transporte y presiones de funcionamiento cada vez mayores, mejor resistencia frente al golpe de ariete y la corrosión, técnicas avanzadas de inspección interna (pistones, ensayos no destructivos), procedimientos de construcción muy mecanizados y rápidos, nuevas técnicas de rehabilitación y renovación de tuberías, sistemas de automatización y telecomunicaciones que permiten la organización de centros desde los que ejercer el telecontrol, la telemedida y el telemando, etc., etc.

Las tuberías para el transporte de agua se vienen haciendo desde hace muchos siglos, pero las tuberías para otros fluidos (petróleo y gas natural, fundamentalmente) son de más moderna implantación, lo que no impide que en la actualidad las redes de oleoductos y gasoductos sumen varios miles de km en España (Figuras nº 1 y 2).

Estas redes se encuentran hoy día en activo crecimiento de su longitud, sobre todo en lo que atañe a los gasoductos, pero los oleoductos, cuya estructura de red apenas ha cambiado en los últimos años, tiene una profunda utilización.

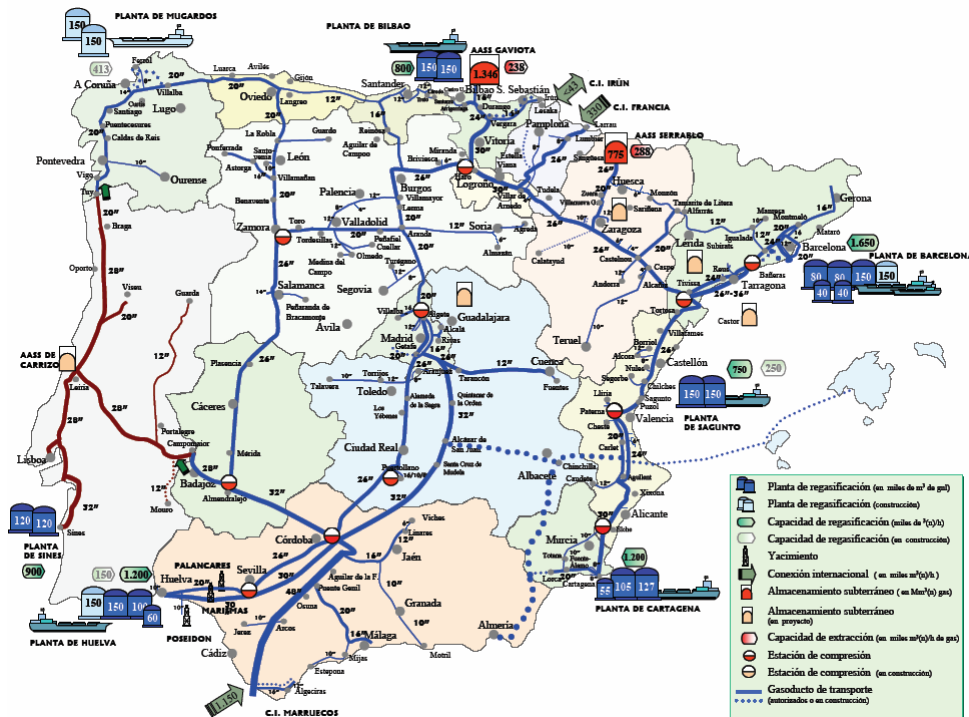
Se puede observar una clara diferencia entre la red de oleoductos y la de gasoductos: En cuanto a la patología; la primera es de tipo ramificada y la segunda es mallada, tendencia que se encuentra en crecimiento en la actualidad, para asegurar el suministro.

Y en su ámbito, los oleoductos constituyen una red enteramente nacional, limitada a la España Peninsular, mientras que los gasoductos tienen conexiones internacionales: Francia, Portugal y Norte de África.

En la actualidad existen tendencias muy prometedoras en el campo tecnológico de las tuberías, como son el proyecto y construcción de tuberías cada vez de mayores diámetros, la utilización por terceros de las tuberías de un cierto propietario (dentro del proceso liberalizador en el seno de la Unión Europea); las tuberías internacionales, conectando países próximos (España con Francia, Portugal, Norte de África), etc. En el campo de la investigación se perfilan temas tan interesantes como el transporte de sólidos por tubería, de cápsulas, tanto como transporte hidráulico (empujadas por agua), como de transporte neumático (empujadas por aire).

Conviene partir de un hecho patente que es la unicidad tecnológica de todas las infraestructuras de tuberías, sea cualquiera el fluido transportado (fluidos energéticos, industriales, desechos, agua, etc.). En lo que atañe a lo propiamente llamado “Transporte por Tubería” en la actualidad, es decir, a los oleoductos y gasoductos, éstos constituyen unos sistemas de transporte de energía, la cual va a ser utilizada, en parte, por los otros medios de transporte, lo que determina una implicación interactiva de los campos de la Energía y el Transporte.

Figura 1. Red básica de gasoductos y transporte secundario



Fuente: Comisión nacional de la energía

Figura 2. Red de oleoductos



Fuente: CLH

1.1. Conceptos básicos del transporte por tubería

El transporte por tubería es una tecnología, queriendo expresar con esta palabra un conjunto de conocimientos técnicos que hacen posible la implantación (proyecto y construcción) y la explotación de instalaciones de este tipo (oleoductos, gasoductos, etc.). Dicha tecnología se apoya fundamentalmente en una ciencia: la Mecánica de fluidos, con el caso particular de la Hidrodinámica y la Hidráulica, para los líquidos.

En esencia, el transporte por tubería es la tecnología opuesta al aprovechamiento energético de una corriente de fluido. En éste se extrae la energía del fluido en movimiento dentro de la tubería (conducción forzada) mediante la turbina. En el transporte por tubería, por contra, se inyecta en el fluido la energía necesaria, en su caso, para mantener el movimiento, mediante la máquina inversa (bomba o compresor). Es decir, el Transporte por Tubería es un consumidor de energía, como cualquier otro modo de transporte.

Así que, en el cálculo y análisis de las redes de tuberías, es muy importante llegar a conocer la variación de la energía (cinética, potencial de presión y gravitatoria) contenida en el fluido a lo largo de la conducción, en el proceso de su movimiento por el interior de la tubería, y de ahí deducir que cantidad de energía, y en qué punto conviene inyectarla en el fluido para mantener su movimiento, lo que en definitiva determina la potencia a instalar en las estaciones de bombeo o de compresión y la ubicación de éstas.

En la concepción de un sistema de transporte por tubería, se plantean varios temas de cierta trascendencia:

1. Elegir el material de la tubería (en general se utilizan el acero para los oleoductos y gasoductos de media y gran importancia, resultando los plásticos modernos - polietileno - cada vez más en las líneas de tubería de menor importancia).
2. Seleccionar el trazado idóneo para la conducción, teniendo en cuenta una variada gama de condicionantes: confluencia de perfil longitudinal con la línea piezométrica; relieve topográfico; geología y geotecnia; medio ambiente; servicios afectados; expropiaciones; explotación, etc.).
3. Determinar el diámetro interior de la tubería capaz de transportar los caudales de fluido demandados.
4. Determinar el espesor de la tubería que resista las acciones estructurales o mecánicas, que ocasionan las presiones de trabajo o funcionamiento, así como las acciones del medio exterior.

La buena concepción y diseño conlleva, en resumidas cuentas, un proceso de optimización, en el que se calcularán y relacionarán los diversos parámetros que actúan, con las formulaciones adecuadas (teóricas y empíricas), de las que se deducirán las velocidades, las presiones, la energía disponible y la consumida en el transporte por la tubería, etc, todo ello con la finalidad de conocer la pérdida de carga y, por lo tanto, el consumo de energía en el transporte, de cada alternativa considerada.

Así como la selección del diámetro y el espesor admiten un número de soluciones relativamente limitado, la determinación del trazado y el diámetro interior tienen muchas soluciones posibles. Dentro de un rango de velocidades y presiones admisibles se pueden elegir muchos valores para el diámetro a disponer para un

mismo caudal. Tras los correspondientes estudios de costes para las diversas alternativas posibles (costes totales: inversión, consumo de energía, explotación), se intentará obtener el diámetro óptimo de la tubería, que hace mínimo el coste total del transporte. De manera semejante, se puede considerar un diámetro óptimo desde el punto de vista de consumo energético en el transporte, el que da un valor mínimo de éste.

1.2. La tubería y los otros modos de transporte

El Transporte por Tubería es uno de los seis modos de transporte principales (transporte por carretera, por ferrocarril, por tubería, marítimo, fluvial y aéreo), a los que se podían agregar otros dos modos de transporte (línea eléctrica de alta tensión y transporte por cable). En España, desgraciadamente, el transporte fluvial es prácticamente inexistente.

Limitándonos al sector del transporte de mercancías fluidas, y si consideramos la cuestión desde el punto de vista de la división dicotómica de que todo modo de transporte se compone de dos partes muy diferenciadas: la vía y el vehículo, se puede considerar que la tubería es uno de los cinco modos de transporte principales: camión cisterna, vagón cisterna, tubería, buque tanque y avión.

La tubería, sin embargo, es un modo de transporte en el que coinciden la vía y el vehículo; es decir, no hay vehículo propiamente dicho, lo que presenta, entre otras, las ventajas de que no hay retornos en vacío ni es necesario mover la masa adicional del vehículo (tara).

En la tabla, se presenta de manera esquemática el análisis de estos conceptos.

Tabla 1: Cuadro resumen de los modos de transporte

Modos de transporte	Medios de transporte (Vehículos)		Infraestructuras (Vías)	Transportan		Entorno	Observaciones
	Generales	Para fluidos		Mercancías	Pasajeros		
Por carretera	Automóvil / camión	Camión cisterna	Carreteras	x	x	Terrestre	Pasajeros y todo tipo de mercancías
Por ferrocarril	Vagón de ffcc	Vagón cisterna	Vía férrea	x	x	Terrestre	
Por tubería			Tubería	x		Terrestre y acuático	Vehículo = vía Fluidos energéticos y Otros (agua, etc)
Marítimo	Barco / barcaza	Buque tanque	Puertos	x	x	Acuático	Pasajeros y todo tipo de mercancías
Fluvial							
Aéreo	Avión	Avión cisterna (nodriza)	Aeropuerto	x	x	Atmósfera	
Por línea eléctrica			Tendido de cables			Terrestre y acuático	Energía eléctrica
Por cable	Cabina / cubeta	Cubeta	Funicular / teleférico	x	x	Terrestre	Pasajeros y cierto tipo de mercancías

Fuente: Elaboración propia

1.3. Situación de la red de transporte por tubería

Ante todo, hay que subrayar que las redes de tuberías para el transporte de agua (abastecimientos de agua potable, regadíos, aprovechamientos hidroeléctricos, saneamientos, etc.) no se van a considerar incluidas en este estudio, dadas sus especiales características, que hacen que puedan ser consideradas incluidas en el sector de las “Obras hidráulicas”, más que en el de los “Transportes”. Por ello, las materias a transportar que se analizan aquí son el petróleo crudo y los productos petrolíferos (transportados por la red de oleoductos), así como el gas natural (transportado por la red de gasoductos).

A finales de 2005, la longitud de dichas dos redes, de oleoductos y gasoductos, era de 3.834 kilómetros y 8.740,7 kilómetros (con presión de transporte superior a 16 bar), respectivamente, teniendo en cuenta que en esta última cifra no se incluye la longitud total de las redes de distribución (presión de transporte inferior a 16 bar), que sumaría una longitud de km muy superior a la indicada.

Figura 1. Tubería distribuida y excavación de zanja



Fuente: Elaboración propia

1.4. Magnitudes del transporte y consumos energéticos

Durante el año 2005, las cantidades de materia (así como, su magnitud por la distancia de transporte: t km) transportadas por las redes de oleoductos y gasoductos fueron las siguientes:

Tabla 2: Cantidades transportadas en 2005

RED DE ...	Materia	Miles de t	TWh	Millones de t km
OLEODUCTOS	Petróleo crudo	7.591		2.718
	Productos petrolíferos	29.067		6.510
GASODUCTOS	Gas natural	25.857	376	3.430
TOTALES		62.515		12.658

Fuente: Elaboración propia

En ese mismo año de 2005, la distribución del tráfico interior de mercancías, según modos de transporte fue la siguiente:

Tabla 3: Distribución de tráfico de mercancía en España

MODOS DE TRANSPORTE	Millones de t km	Cuota reparto modal (%)
Carretera	352.515	83,86
Marítimo	11.116	2,64
Oleoductos y gasoductos	12.606	2,99
Ferrocarril	44.040	10,47
Aéreo	77	0,018
TOTALES	420.354	100

Fuente: Elaboración propia

En el citado año 2007, los consumos energéticos totales en el transporte, según los distintos modos, fueron los siguientes:

Tabla 4: Consumos energéticos del transporte en 2007

MODOS DE TRANSPORTE	T J (1)	Reparto modal (%)
Carretera	1.391.260,7	67,55
Marítimo	408.806,3	19,84
Oleoductos y gasoductos	3.708,6	0,18
Ferrocarril	12.766,6	0,61
Aéreo	243.053,1	11,8
TOTALES	2.059.595,30	100

Fuente: Elaboración propia

NOTAS: (1) Abastecimiento de todos los vehículos de carretera en territorio nacional

(2) Incluye suministro a flotas extranjeras en aeropuertos españoles, no usos militares

En lo que respecta al reparto de tipos de energía de los consumos correspondientes a los oleoductos y gasoductos en conjunto, resulta que se desglosan de la siguiente manera, para el mismo año 2007:

Tabla 5: Reparto de los consumos energéticos del transporte por tubería en 2007

Tipo de energía	Cantidad	Unidad
Electricidad	318,8	GWh
Gas licuado	55,7	Miles de toneladas
Gasóleo	0,1	Miles de toneladas
TOTAL	3.708,6	TJ

Fuente: Elaboración propia

Como conclusión, y efectos de ofrecer una idea del orden de magnitud del consumo energético del transporte por tubería (agregando gasoducto y oleoducto), puede concluirse que el consumo específico medio fue 0,0816 kWh/tkm.

2. TRANSPORTE POR TUBERÍA Y LA ENERGÍA

El transporte por tubería y la energía mantienen una estrecha relación, pues, a nivel mundial, y dejando aparte el agua, aquél constituye esencialmente un transporte de energía, ya que las conducciones dedicadas a crudos y productos refinados de petróleo, gas natural y carbón son la inmensa mayoría frente a las dedicadas a materias no energéticas, como etileno, amoníaco, minerales, anhídrido carbónico, nitrógeno, oxígeno, etc.

Parece probable el mantenimiento en el inmediato futuro de esta situación de predominio de las mercancías energéticas, pues aunque se diera un aumento significativo de las conducciones por tubería de materias no energéticas (como podrían ser residuos, sólidos pulverizados o en cápsulas, etc.), se mantendrán los oleoductos y se seguirán potenciando y creciendo las redes de gasoductos. En un futuro a medio plazo, se puede esperar, incluso, un crecimiento aún mayor de los gasoductos, hoy día transportando fundamentalmente gas natural, y que se podrán dedicar a transportar gases sintéticos o de biomasa, así como hidrógeno, vector energético de gran importancia para el futuro de las energías no contaminantes.

2.1. Resistencias al avance

Sin embargo, el aspecto que se va a analizar en lo que sigue es el de la energía consumida en el transporte por tubería, sea el transporte de materias transportadas propiamente energía o no. Se trata del transporte de mercancías en estado fluido o inmersas en una corriente de fluido (caso de transporte de sólidos por tubería), por lo que los consumos energéticos en el transporte proceden del movimiento de una masa fluida respecto al contorno sólido fijo y en reposo que constituye la tubería. Con respecto a los otros medios de transporte, es el caso recíproco del movimiento de un sólido en un medio fluido (barco, en fluidos agua y aire; avión, en fluido aire). Sin embargo, no hay en la tubería el movimiento entre partes sólidas, como el los vehículos de carretera y ferrocarril; bien es verdad, que en estos últimos, también influye la resistencia del aire, pero de manera secundaria, sobre todo a velocidades no demasiado altas.

Tanto en el barco como en el oleoducto (tubería para transporte de líquidos) se da como fundamental la resistencia hidrodinámica, aunque de manera recíproca, mientras que en el avión, se da igualmente que en el gasoducto (tuberías para transporte de gases), se da la resistencia aerodinámica, también de manera recíproca.

Figura 2. Tren de Soldadura



Fuente: Elaboración propia

2.2. Movimiento del fluido en la tubería

El movimiento de los fluidos por el interior de las tuberías se caracteriza, desde el punto de vista energético, por una serie de características fundamentales:

Respecto al perfil longitudinal de la línea de tubería, hay que subrayar que son iguales desde el punto de vista de consumo energético, tanto las subidas como las bajadas, habiendo únicamente la correspondiente conversión de energía potencial de situación en el campo gravitatorio por energía elástica de compresión (en las bajadas) o a la inversa, en las subidas, pues, por continuidad se mantiene constante la energía cinética de la corriente del fluido [$V \rho = \text{constante}$, siendo V (m/s), la velocidad media de la corriente y ρ (kg/m³), la masa específica del líquido transportado]. Dicho de otra manera, se aprovecha íntegramente la energía en las bajadas. Por ello, se puede enunciar que toda la energía que se le aplica al fluido, menos la consumida en proceso del transporte, se puede aprovechar o queda como remanente en el propio fluido. De tal manera, de acuerdo con lo anterior, que la energía consumida en el transporte depende de la longitud recorrida, no del perfil longitudinal de la tubería, además, por supuesto, de la cantidad de masa transportada. Respecto a esto, parece conveniente tomar como unidad de transporte la (t km), es decir, 1000 kg de masa transportada a un kilómetro de longitud de tubería, referente a la cual se pretende calcular la energía consumida.

Respecto a los arranques (paso del reposo, $V = 0$, a la velocidad de régimen de funcionamiento, V), las paradas (paso de la velocidad de régimen, V , hasta la velocidad 0) y las variaciones del caudal transportado (que se traducen en cambios de velocidad), no hay ningún consumo adicional, cualquiera que sea la aceleración con la que se realicen dichos arranques o paradas.

Únicamente, si dicha aceleración es alta, se producen ondas de presión apreciables, que se propagan a lo largo de la masa fluida, de manera semejante y con celeridad también parecida, a la transmisión del sonido en el fluido que se trate, produciendo los fenómenos llamados transitorios, que duran muy poco tiempo, comparativamente con los largos períodos de funcionamiento en régimen permanente.

Dichos fenómenos transitorios pueden estar en dos casos: primero, ser de carácter “voluntario” (cambios de velocidad, en la explotación del oleoducto) o segundo, “involuntario”, como los producidos en casos de avería o emergencia (parada de bombas por falta de corriente eléctrica, válvulas, u otros mecanismos, que funcionen mal, etc.).

Los del primer caso se procura que se realicen en las condiciones más favorables para que no sufra la instalación (por los cambios de presión que llevan aparejados), lo que da como consecuencia que prácticamente no tengan consumo de energía adicional a la del transporte en funcionamiento de régimen permanente; los segundos, se procuran combatir con elementos de protección, para conducirlos al primer caso.

Por todo ello, se puede resumir que los arranques, paradas y fenómenos semejantes no tienen incidencia apreciable en el consumo energético del transporte.

De lo expuesto hasta ahora, se desprende que no hay “frenadas” propiamente dichas en el transporte por tubería, pues las “paradas” de la corriente fluida se realizan de manera muy espaciada y muy lenta, de tal manera que se den regímenes transitorios que afecten muy poco a la variación de la presión, con sus fenómenos de sobrepresión y depresión que lleva aparejados, por lo que son muy poco consumidoras de energía, y así la energía que lleva el fluido se aprovecha casi enteramente hasta llegar al destino, parando la corriente de una manera suave.

3. ENERGÍA CONSUMIDA EN EL TRANSPORTE DE LÍQUIDOS POR TUBERÍA (OLEODUCTOS)

La energía que se le aporta a la masa de fluido para su movimiento tiene una determinada procedencia, más o menos lejana, lo que hará que existan unas pérdidas de energía en su propio transporte hasta la llegada al motor que acciona el bombeo. Estas pérdidas de energía “aguas arriba” del motor no se consideran en lo que sigue, si bien han sido estimadas en Pilo et al. (2008 ME 9) los porcentajes para el oleoducto y el gaseoducto.

Ahora bien, en el funcionamiento motor-bomba se tiene un cierto rendimiento menor que la unidad (η), lo que hace que haya que aplicar un coeficiente de mayoración ($1/\eta$) a la energía propiamente consumida en el movimiento del líquido a lo largo de la tubería (E'), para que se obtenga la energía consumida en el transporte por el oleoducto (E), contando desde el punto de entrada de la energía en el sistema motor-bomba.

Se considera un tramo de tubería de longitud $x_2 - x_1 = L = 1000$ m, todo él con un perfil horizontal ($\Delta z = 0$) y de diámetro (D) constante, lo que hace que, en régimen permanente, la velocidad (V) de la corriente de líquido también sea constante (pues, en los líquidos se hace el supuesto de que los cambios de volumen son tan pequeños que se puede considerar $\rho = \text{constante}$).

La potencia consumida en el transporte del líquido en dicho tramo viene dada por la expresión:

$$W(\text{J/s}) = -(dP/dx)LQ = Q(P_1 - P_2) = Q\Delta P \quad [1]$$

siendo:

P_1 y P_2 (N/m^2), las presiones en los puntos x_1 y x_2

Q (m^3/s), el caudal de líquido circulante.

El tiempo de transporte entre x_1 y x_2 es:

$$T(\text{s}) = L(\text{m})/V(\text{m/s}) = 1000/v \quad [2]$$

siendo:

V (m/s) la velocidad de la corriente de líquido.

La masa transportada en dicho tiempo es:

$$m(t) = (\rho L \pi D^2 / 4) / 1000 \quad [3]$$

siendo:

ρ (kg/m^3), la masa específica del líquido

D (m), el diámetro interior de la tubería

La energía consumida en el desplazamiento del líquido a lo largo del tramo de tubería (E') viene dada por la siguiente expresión:

$$E'(\text{kJ/t km}) = (WT/m)/1000 = 4Q\Delta P/V\rho\pi D^2 \quad [4]$$

Teniendo en cuenta que

$$Q = V\pi D^2/4 \quad 4Q/\pi D^2 = V$$

Resulta que

$$E' = \Delta P/\rho \quad [5]$$

La caída de presión en el transporte a lo largo de la tubería viene dada por la ecuación de Darcy-Weisbach):

$$\Delta P = f L \gamma V^2 / 2gD \quad [6]$$

siendo:

$\gamma(N/m^3)$, el peso específico del líquido

f (adimensional), el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

El valor de f se obtiene con la fórmula implícita de Colebrook-White:

$$f^{-0.5} = -2\text{LOG}\left[K/(3,71D) + (2,51/\text{Re})f^{-0.5}\right] \quad [7]$$

o con la explícita aproximada (de Prabhata y otros):

$$f = 0,25 / \left(\text{LOG}\left[K/(3,71D) + 5,74/\text{Re}^{0,9}\right]\right)^2 \quad [8]$$

siendo:

K (m), la rugosidad de la pared interna de la tubería

Re (número de Reynolds) = DV/ν

ν (m^2/s), la viscosidad cinemática del líquido

Aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach en la ecuación 2, resulta:

$$E'(kJ/t km) = f L \gamma V^2 / 2\rho G D = 1000 f V^2 / 2 D \quad E'(MJ/t km) = f V^2 / 2D$$

Finalmente, se tiene:

$$E(MJ/t km) = (f/2 \eta)(V^2/D) \quad [9]$$

siendo:

f y η adimensionales

y debiendo expresarse V , en m/s , y D , en m

Como $f = \psi(K, \nu, V, D)$, resulta finalmente que:

$$E = \varphi(K, D, \nu, V, \eta) \quad [10]$$

siendo:

K y D , parámetros de la tubería

ν , característica de la naturaleza del líquido transportado

V , parámetro del movimiento de la corriente del líquido

η , coeficiente de rendimiento motor-bomba

Aplicación a casos concretos

Tabla 6. Consumo de energía de gasóleo

V (m/s) =		1				1,5				2				
D = (m)	0,20	0,00025	44.444	0,0222	0,0695	0,8	66.667	0,0206	0,1449	1,2	88.889	0,0196	0,2452	1,6
	0,25	0,00020	55.556	0,0211	0,0528	1,2	83.333	0,0196	0,1102	1,8	111.111	0,0187	0,1867	2,5
	0,30	0,00017	66.667	0,0202	0,0422	1,8	100.000	0,0188	0,0882	2,7	133.333	0,0179	0,1495	3,5
	0,35	0,00014	77.778	0,0196	0,0349	2,4	116.667	0,0182	0,0731	3,6	155.556	0,0174	0,1240	4,8
	0,40	0,00013	88.889	0,0190	0,0297	3,1	133.333	0,0177	0,0622	4,7	177.778	0,0169	0,1055	6,3
	0,45	0,00011	100.000	0,0185	0,0257	4,0	150.000	0,0172	0,0539	6,0	200.000	0,0165	0,0915	8,0
	K/D	Re	f	E	T	Re	f	E	T	Re	f	E	T	
V (m/s) =		2,5				3				3,5				
D = (m)	0,20	0,00025	111.111	0,0189	0,3698	2,0	133.333	0,0184	0,5184	2,4	155.556	0,0180	0,6906	2,8
	0,25	0,00020	138.889	0,0180	0,2817	3,1	166.667	0,0176	0,3951	3,7	194.444	0,0172	0,5265	4,3
	0,30	0,00017	166.667	0,0173	0,2258	4,4	200.000	0,0169	0,3167	5,3	233.333	0,0165	0,4222	6,2
	0,35	0,00014	194.444	0,0168	0,1873	6,0	233.333	0,0164	0,2629	7,2	272.222	0,0160	0,3505	8,4
	0,40	0,00013	222.222	0,0163	0,1594	7,9	266.667	0,0159	0,2238	9,4	311.111	0,0156	0,2985	11,0
	0,45	0,00011	250.000	0,0159	0,1384	10,0	300.000	0,0155	0,1942	12,0	350.000	0,0152	0,2591	13,9
	K/D	Re	f	E	T	Re	f	E	T	Re	f	E	T	
Viscosidad cinemát. líquido transport.: (v.c.)													0,0000045	
Tubería acero: K (m) =													0,00005	
E (MJ/t km)											T (10 ⁶ m ³ /año)			
Rendimiento =													0,8	

Tabla 7. Consumo de energía de gasolina

V (m/s) =		1				1,5				2				
D = (m)	0,20	0,00025	133.333	0,0184	0,0576	0,8	200.000	0,0175	0,1228	1,2	266.667	0,0169	0,2112	1,6
	0,25	0,00020	166.667	0,0176	0,0439	1,2	250.000	0,0167	0,0937	1,8	333.333	0,0161	0,1612	2,5
	0,30	0,00017	200.000	0,0169	0,0352	1,8	300.000	0,0160	0,0751	2,7	400.000	0,0155	0,1294	3,5
	0,35	0,00014	233.333	0,0164	0,0292	2,4	350.000	0,0155	0,0624	3,6	466.667	0,0150	0,1075	4,8
	0,40	0,00013	266.667	0,0159	0,0249	3,1	400.000	0,0151	0,0532	4,7	533.333	0,0146	0,0916	6,3
	0,45	0,00011	300.000	0,0155	0,0216	4,0	450.000	0,0148	0,0461	6,0	600.000	0,0143	0,0795	8,0
	K/D	Re	f	E	T	Re	f	E	T	Re	f	E	T	
V (m/s) =		2,5				3				3,5				
D = (m)	0,20	0,00025	333.333	0,0165	0,3227	2,0	400.000	0,0162	0,4570	2,4	466.667	0,0160	0,6141	2,8
	0,25	0,00020	416.667	0,0158	0,2463	3,1	500.000	0,0155	0,3489	3,7	583.333	0,0153	0,4689	4,3
	0,30	0,00017	500.000	0,0152	0,1977	4,4	600.000	0,0149	0,2801	5,3	700.000	0,0148	0,3765	6,2
	0,35	0,00014	583.333	0,0147	0,1643	6,0	700.000	0,0145	0,2327	7,2	816.667	0,0143	0,3129	8,4
	0,40	0,00013	666.667	0,0143	0,1400	7,9	800.000	0,0141	0,1983	9,4	933.333	0,0139	0,2666	11,0
	0,45	0,00011	750.000	0,0140	0,1216	10,0	900.000	0,0138	0,1723	12,0	1.050.000	0,0136	0,2316	13,9
	K/D	Re	f	E	T	Re	f	E	T	Re	f	E	T	
Viscosidad cinemát. líquido transport.: (v.c.) (m ²)													0,0000015	
Tubería acero: K (m) =													0,00005	
E (MJ/t km)											T (10 ⁶ m ³ /año)			
Rendimiento =													0,8	

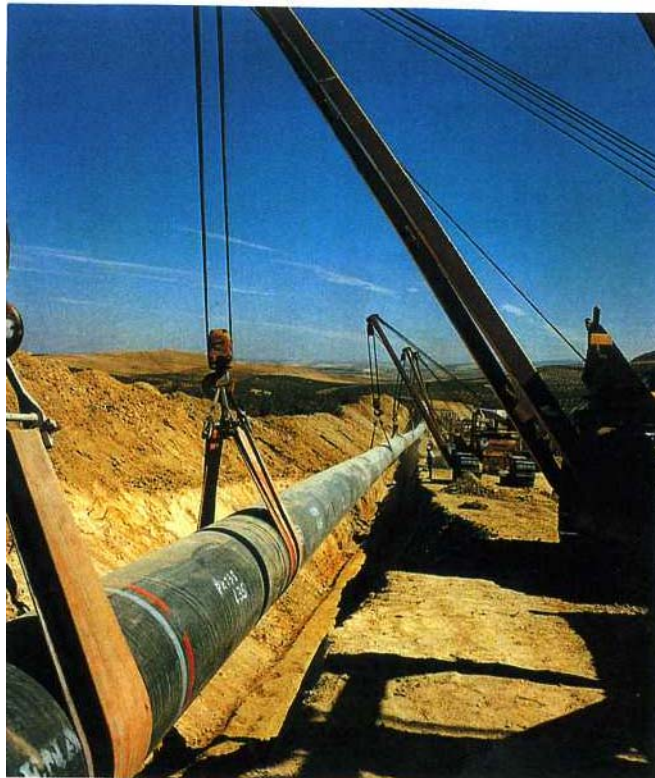
4. ENERGÍA CONSUMIDA EN EL TRANSPORTE DE GASES POR TUBERÍA (GASODUCTOS)

La compresibilidad de los gases es tan alta que no se puede seguir el supuesto de flujo incompresible, como en el régimen permanente de los líquidos.

Es decir, que siendo (por continuidad) $Q \gamma = \text{constante}$, y para el caso de tubería de diámetro (D) constante, $V \gamma = \text{constante}$; al no ser constante el peso específico γ , tampoco lo será V . Por ello, se produce una aceleración a lo largo del gasoducto al ir bajando la presión y , por consiguiente, γ .

Esta descompresión a lo largo de la tubería se produce lentamente, por lo que se puede considerar flujo isotérmico. Se tomará como temperatura media del transporte la de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T = 288\text{ K}$).

Figura 3. Puesta en zanja



4.1. Cálculo del consumo de energía

Considerando el transporte por un tramo de gasoducto de tubería horizontal, de longitud L entre los dos puntos extremos del tramo (i : inicial; f : final), la ecuación que se suele emplear para el cálculo de la caída de presión, en los gasoductos que transportan un gas natural de composición semejante al que se utiliza en España, es la siguiente:

$$P_i^2 - P_f^2 = 1,56 \times 10^6 f L d Z_m Q_e^2 / D^5 \quad [11]$$

Siendo:

P_i y P_f , presiones absolutas (bar), en los extremos del tramo

f , coeficiente de fricción de Darcy (adimensional)

L , longitud de tubería (km), entre los puntos i y f

D , diámetro interior de la tubería (mm)

d , relación entre los pesos específicos del gas natural y del aire

Q_e , caudal de gas (m^3/h), medido en condiciones estandar ($15^\circ C$ y $1\ atm$)

Z_m , valor medio del factor de compresibilidad (Z), para la presión media (P_m) en el tramo

El coeficiente f de Darcy se calcula por las mismas expresiones que en el caso de los líquidos, la fórmula implícita de Colebrook-White:

$$f^{-0,5} = -2 \text{LOG} \left[K/(3,71D) + (2,51/Re)f^{-0,5} \right] \quad [12]$$

o la explícita aproximada (de Prabhata y otros):

$$f = 0,25 / \left(\text{LOG} \left[K/(3,71D) + 5,74/Re^{0,9} \right] \right)^2 \quad [13]$$

siendo:

$K(mm)$, la rugosidad de la pared interna de la tubería

Re (número de Reynolds) = $(D/1000)V/v$ (V , en m/s)

$v(m^2/s)$, la viscosidad cinemática del gas

Aunque la velocidad V varía (creciendo) a lo largo del proceso de transporte en el tramo de tubería considerado, resulta f constante en todos los puntos de dicho tramo, pues Re lo es, si consideramos su expresión en función de la viscosidad dinámica (μ), en lugar de la viscosidad cinemática (v):

$$v = \mu/\rho = g \mu/\gamma \quad Re = DV/v = (D/g \mu)(V\gamma) \quad [14]$$

La relación de pesos específicos se obtiene mediante la expresión: $d = \gamma_e/\gamma_a$

siendo:

$\gamma_e = 7,997\ N/m^3$, el peso específico en condiciones estandar, para el gas natural considerado

$\gamma_a = 12,2\ N/m^3$, en peso específico en las mismas condiciones, para el aire

Luego, $d = 0,6555$

El factor de compresibilidad (Z) en cada punto de la tubería de transporte es función de la naturaleza del gas, de la temperatura y de la presión. Para el gas natural considerado, y para la temperatura constante de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, responde a la siguiente ecuación, en función de la presión P (bar) en el punto considerado:

$$Z = 1 - 2,8 \times 10^{-3} P \quad [15]$$

El valor de Z_m (factor de compresibilidad media del tramo) se obtiene particularizando $P = P_m$, siendo P_m la presión media en el tramo de tubería considerado, que dada la forma parabólica de la ecuación [ec. 5] se puede demostrar que responde a la siguiente ecuación:

$$P_m = 2/3 \left[P_i + P_f^2 / (P_i + P_f) \right] \quad [16]$$

Para presiones de transporte inferiores a 16 bar, se puede considerar, en general, que Z_m es igual a la unidad. Para presiones de transporte comprendidas entre 16 y 72 bar (ésta última es la máxima de los gasoductos de transporte), se puede considerar, Z_m igual a un valor medio de 0,88.

De modo que, con todo lo visto en lo que antecede, la ecuación [17] puede ponerse de la siguiente forma:

$$P_i^2 - P_f^2 = A Q_e^2 / D^5 \quad [17]$$

Siendo A un parámetro que se deduce de:

$$A = 1,56 \times 10^6 f L d Z_m$$

Tomando $L = 1\text{ km}$ y $d = 0,6555$, resulta:

$$A = 1,02 \times 10^6 f Z_m$$

Poniendo la ecuación de los gases reales en la siguiente forma:

$$\gamma = (N/RT)(P/Z) = k'(P/Z) \quad [18]$$

Siendo:

N , peso molecular del gas

R , constante de los gases

$k' = N/RT$, constante

Y la ecuación de continuidad de la siguiente manera:

$$Q_e \gamma_i = Q_i \gamma_i \quad [19]$$

y despejando Q_e : [18]

$$Q_e = Q_i (\gamma_i / \gamma_e) = Q_i (k P_i / Z_i \gamma_e) = (3600 V_i \pi D^2 / 4) (k P_i / Z_i \gamma_e) = (900 \pi k' / \gamma_e) (P_i / Z_i) (V_i D^2)$$

con V_i en m/s.

$$Q_e^2 = k'' (P_i / Z_i)^2 (V_i^2 / D) \quad [20]$$

Donde:

$$k'' = (900 \pi N / RT \gamma_e)^2$$

Entrando en la [17], se tiene:

$$P_i^2 - P_f^2 = A k'' (P_i/Z_i)^2 (V_i^2/D)$$

$$P_i^2 - P_f^2 = B (V_i^2/D) \quad [21]$$

Siendo:

$$B = A k'' (P_i/Z_i)^2 = 1,02 \times 10^6 (900 \pi N / RT \gamma_e)^2 f Z_m (P_i / (1 - 2,8 \times 10^{-3} P_i))^2$$

$$B = k f Z_m (P_i / (1 - 2,8 \times 10^{-3} P_i))^2 \quad k = 8,15 \times 10^{12} (N / RT \gamma_e)^2$$

Suponiendo conocidos, como datos de partida, P_i y V_i (que se puede obtener a partir de Q_e , utilizando la ecuación 9), se calcula P_f , utilizando la ecuación 19:

$$P_f = (P_i^2 - B V_i^2 / D)^{0,5} \quad [22]$$

La caída de presión será igual a:

$$\Delta P = P_i - P_f \quad [23]$$

Adaptando la ecuación 2, para los gases:

$$E' = \Delta P / \rho_m = (P_i - P_f) / \rho_m = (P_i - P_f) g / \gamma_m \quad [24]$$

Siendo:

$$\gamma_m = \gamma_e P_e Z_m / P_m Z_e$$

En la que es:

$$P_e = 1,013 \text{ bar abs.}$$

$$Z_e = 1$$

$$P_m = 2/3 [P_i + P_f^2 / (P_i + P_f)]$$

$Z_m = 1 - 2,8 \times 10^{-3} P_m$ (confirmaremos así el valor primeramente estimado de 1/0,88, según la presión de transporte de los gasoductos)

y finalmente:

$$E' = (P_i - P_f) g / \gamma_m = (P_i - P_f) g P_m / 1,013 \gamma_e Z_m \quad [25]$$

$$E (MJ/t km) = (1/\eta) (P'_i - P'_f) g P'_m / 1,013 \gamma_e Z_m \quad [26]$$

Suponiendo que, en esta última ecuación, las presiones no se expresan en bar, sino en kN/m^2

4.2. Resumen del resultado del procedimiento de cálculo

Los datos de partida son:

Características del gas

$\gamma_e = 7,997 \text{ N/m}^3$, el peso específico en condiciones estandar, para el gas natural considerado

$\gamma_a = 12,2 \text{ N/m}^3$, el peso específico en las mismas condiciones, para el aire

$\mu(\text{kg/m s})$, la viscosidad dinámica del gas a 15 °C

Características de la tubería

D , diámetro

K , rugosidad

Características del transporte

La presión en el punto inicial, P_i en bar

El caudal a transportar, Q_e en m^3/h , medido en condiciones estandar

Cálculos a realizar

d , densidad del gas relativa al aire

V_i en m/s , velocidad del gas en el punto inicial

f , coeficiente de Darcy

Se estima $Z_m = 1$ (ramales de presión menor de 16 bar) = 0,88 (tuberías de alta presión, entre 16 y 72 bar).

P_f , en bar, presión al final del tramo de un km .

Se comprueba el valor de Z_m

Se calcula P_m , en bar

Se ponen las presiones (P'_i, P'_f, P'_m) en kN/m^2

Finalmente, utilizando la ecuación 25, se obtiene la energía (E) consumida en el transporte.

Figura 4. Tubería en zanja. Revestimiento de juntas



Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFIA

Monografía Enertrans 9: “Flujos de la energía de la electricidad para el transporte”:
Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús
Jiménez Octavio

Documentos del Proyecto EnerTrans

Monografías EnerTrans

Monografía 1: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”: José Ignacio Pérez Arriaga, Eduardo Pilo de la Fuente, Ignacio de L. Hierro Ausín

Monografía 2: “Usos de la energía en el transporte”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 3: “Modelos de consumos y emisiones: Estado del arte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro

Monografía 4: “Análisis de las estadísticas de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el transporte”: Alberto Cillero, Paula Bouzada Outeda

Monografía 5: “Tablas input-output relacionadas con las estadísticas de consumos y emisiones en el transporte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 6: “Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 7: “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 8: “Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo, Álvaro Gómez, Ángel Fernández.

Monografía 9: “Flujos de la energía de la electricidad para el transporte”: Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio

Monografía 10: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras”: Timoteo Martínez Aguado, M^a José Calderón Milán, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 11: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 12: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión”: José María López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 13: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar”: Alberto Cillero Hernández, Gustavo Martinelli, Paula Bouzada Outeda

Monografía 14: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Monografía 15: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Monografía 16: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 17: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Monografía 18: “ENERTRANS: Modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte”: Grupo de investigación del proyecto Enertrans

Notas técnicas EnerTrans

Nota técnica 1: “Introducción al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 2: “Informe sobre el tráfico internacional y el consumo de carburante en el sector aeronáutico”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 3: “Informe sobre el suministro de combustible en los aeropuertos en España”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 4: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte aéreo”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 5: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario”: Alberto García Álvarez, Eduardo Fernández González

Nota técnica 6: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 7: “Informe sobre el tráfico español y el consumo de carburante en el sector marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 8: “Análisis de documentación referida al transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 9: “Aspectos generales del transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 10: “Características de la navegación marítima”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 11: “Consumo de los servicios auxiliares en el automóvil”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 12: “Notas sobre los valores del coeficiente de resistencia a la rodadura”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 13: “Tipos de aeronaves según su compañía constructora”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

