

K. Weissermel / H. -J. Arpe

Química Orgánica Industrial

Productos de partida e intermedios más importantes



EDITORIAL REVERTÉ

Química Orgánica Industrial

Productos de partida e intermedios más importantes

K. Weissermel / H. -J. Arpe



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

**Industrielle Organische Chemie 2. Auflage
Bedeutende Vor- und Zwischenprodukte**

Edición original en lengua inglesa publicada por

Verlag Chemie, Weinheim, 1978

Copyright © Verlag Chemie GmbH, D-6940, Weinheim

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 1981

ISBN: 978-84-291-7989-7

Edición en e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2024

ISBN: 978-84-291-9846-1

Versión española coordinada y traducida por:

Dr. Joaquín de Pascual Teresa

Departamento de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

08029 Barcelona. España

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Prólogo

La Química Orgánica Industrial aparece, en general, en series de enciclopedias y manuales y, también, cada vez en mayor proporción, en monografías detalladas. No siempre es fácil conocer con rapidez y seguridad el estado actual de la Química Orgánica en la Industria por estas fuentes de información. Es por ello que surgió la necesidad de una exposición renovada limitada a los productos de partida e intermedios más importantes. Los autores se han esforzado, basados en su experiencia industrial y la adquirida en conferencias y cursos en su lugar de residencia, en depurar su contenido y exponerlo de forma que refleje las cuestiones y análisis diarios de problemas de investigación y desarrollo y resulten comprensibles al lector.

El libro va dirigido a un amplio y múltiple círculo de lectores: A los estudiantes de Química les proporciona puntos de vista de los productos de partida e intermedios más importantes y del desarrollo de los procesos industriales de obtención de los mismos, que quizá alguna vez comprobarán. A los profesores de Universidad y Escuelas Técnicas Superiores les informa sobre las síntesis orgánicas empleadas y sus constantes cambios en los procesos de obtención y en materias primas básicas, así como de los trabajos de investigación que ello origina. A los químicos y colegas de la industria química que profesan otras disciplinas —como ingenieros, comerciantes, juristas, directores de empresas— a los que puede hacer más transparentes las polifacéticas relaciones tecnológicas, científicas y económicas y sus tendencias de desarrollo.

El libro está dividido en 14 capítulos, en los que los productos de partida e intermedios se han agrupado con el máximo rigor de correlación. Con todo, no es siempre posible evitar alguna arbitrariedad. Hay un capítulo de introducción dedicado al acopio de energía y materias primas.

Por regla general, tras la exposición de la importancia y desarrollo histórico de un producto se exponen primeramente las posibilidades de obtención, preferentemente con los procesos actualmente en uso, así como de sus derivados más importantes. En los apartados sobre «grandes» productos industriales orgánicos, se incluyen con frecuencia pronósticos sobre posibles desarrollos futuros. Para la modificación por los defectos de base tecnológica o de proceso químico y los esfuerzos futuros para el cambio, se apunta hacia productos de partida disponibles más baratos o mejores e indican posibles soluciones que en ningún caso aspiran a reclamar para ellos la perfección. Estas indicaciones deben proporcionar a los profesionales una imagen del problema, a cuya solución pueden contribuir.

Una aspiración de los autores ha sido preocuparse, en gran medida, de que la calidad de la información sea satisfactoria y suficiente para un amplio sector de lectores. Se ofrecen tres formas de información:

1. El texto corriente de la parte principal.
2. En los márgenes, el resumen del texto principal.
3. Los esquemas de fórmulas y procesos, en los que se indican en cada capítulo las relaciones entre los distintos productos.

Estas tres formas derivan del hábito extendido entre muchos lectores que tras el estudio de un texto subrayan las partes más importantes o las resúmenes. Este esfuerzo se les ha aliviado en los márgenes, en los que en su forma más breve y en secuencia lógica se resume lo expresado en el texto principal, de manera que pueden informarse rápidamente sin necesidad de leer todo el contenido del mencionado texto principal.

Los esquemas de fórmulas y procesos que corresponden a un capítulo van intercalados en el texto, de modo que resultan comprensibles por la lectura de los párrafos. En el texto principal no se ha incluido ningún esquema de proceso particular, puesto que sería forzoso tener siempre que volver a repetir etapas de procesos; en cambio se le indican al lector las peculiaridades del proceso.

El índice hace posible, por rigurosa clasificación de las palabras, el rápido aprovechamiento de las informaciones.

Para comprobar los múltiples datos tecnológicos y químicos han colaborado numerosos colegas, además de los de Hoechst AG, con el examen crítico de partes del manuscrito y con sus valiosos consejos. Damos cordialmente las gracias a los señores Dr. H. Friz, Dr. W. Reif (BASF); Dr. R. Streck, Dr. H. Weber (Hüls AG); Dr. W. Jordan (Phenolchemie); Dr. B. Cornils, Dr. J. Falbe, Dr. W. Payer (Ruhrchemie AG); Dr. K. H. Berg, Dr. I. F. Hudson (Shell); Dr. G. König, Dr. R. Kühn, Dr. H. Tettersoo (UK-Wesseling).

Otros colegas y colaboradores de la Hoechst AG han proporcionado considerable ayuda, examinando algún capítulo, dando datos estadísticos, preparando esquemas de fórmulas, pasando manuscrito a máquina, a los que aquí queremos también dar las gracias cordialmente. Merecen atención especial en este sentido los señores Dr. U. Dettmeier, M. Keller, Dr. E. I. Leupold, Dr. H. Meidert, Prof. Dr. R. Steiner, que han examinado críticamente la mayor

parte del manuscrito, completándolo y corrigiéndolo. Con todo, ha sido decisivo para la elección de las materias el acceso a las experiencias e informaciones mundiales de la Hoechst AG.

Además han contribuido a la realización de este libro la paciencia y condescendencia de los familiares íntimos y amigos de forma importante en los largos meses de la redacción y elaboración del manuscrito. Damos también las gracias a Verlag Chemie que nos propuso hacer este libro y por su comprensiva deferencia al aceptar las ideas de los autores y proporcionarle una presentación excelente.

Frankfurt/M.-Höchst

Klaus Weissermel
Hans-Jürgen Arpe

Prólogo a la 2.^a edición

Apenas transcurrido un año ha sido necesaria una segunda edición de la «Química Orgánica Industrial». La gran aceptación que ha encontrado el libro significa, al mismo tiempo, estímulo y compromiso para que aparezca de nuevo en forma revisada y ampliada.

Así, los datos estadísticos se han llevado a un nuevo nivel, en consideración a las traducciones al inglés, italiano y japonés y ampliadas en el campo alemán en donde ha sido posible.

Se han incluido otros productos con sus procesos de obtención. En numerosos sitios se han añadido algunas convenientes explicaciones, dando cabida a nuevos hechos importantes y mecanismos adicionales para profundizar en la comprensión de los procesos industriales fundamentales.

A todos los lectores de nuestro libro, que con crítica y estímulos han contribuido a su continuación, queremos darles las gracias aquí cordialmente y rogarles, así como a los nuevos usuarios de la «Química Orgánica Industrial», que sigan apoyándonos.

Frankfurt/M.-Höchst

Klaus Weissermel
Hans-Jürgen Arpe

Índice analítico

Índice analítico

1.	Perspectiva del acopio de materias primas y suministro de energía	1
1.1.	Demanda presente y previsible de energía	2
1.2.	Disponibilidad de cada fuente de energía	3
1.2.1.	Petróleo	3
1.2.2.	Gas natural	4
1.2.3.	Carbón	4
1.2.4.	Combustibles nucleares	5
1.3.	Perspectivas de abastecimiento energético futuro	6
1.4.	Estado actual y previsible de las materias primas	8
1.4.1.	Productos primarios petrolquímicos	8
1.4.2.	Productos de la refinación del carbón	13
2.	Productos básicos de la síntesis industrial	17
2.1.	Gas de síntesis	17
2.1.1.	Producción de gas de síntesis	17
2.1.1.1.	Gas de síntesis por gasificación de carbón	17
2.1.1.2.	Gas de síntesis por disociación de gas natural y de petróleo	21
2.1.2.	Purificación y aplicación del gas de síntesis	22
2.2.	Obtención de los componentes puros del gas de síntesis	25
2.2.1.	Monóxido de carbono	25
2.2.2.	Hidrógeno	27
2.3.	Reactivos primarios C ₁	30
2.3.1.	Metanol	30
2.3.1.1.	Obtención de metanol	30
2.3.1.2.	Posibilidades de aplicación del metanol	32
2.3.2.	Formaldehído	37
2.3.2.1.	Formaldehído a partir de metanol	38
2.3.2.2.	Obtención de formaldehído a partir de otros productos	40
2.3.2.3.	Aplicaciones del formaldehído	41
2.3.3.	Ácido fórmico	42
2.3.4.	Ácido cianhídrico	44
2.3.5.	Metilaminas	48
2.3.6.	Derivados halogenados del metano	49
2.3.6.1.	Clorometanos	50
2.3.6.2.	Clorofluorometanos	55

3	Olefinas	59
3.1.	Desarrollo histórico de la química de las olefinas	59
3.2.	Olefinas por escisión de hidrocarburos	60
3.3.	Procesos especiales de obtención de olefinas	63
3.3.1.	Etileno, propileno	63
3.3.2.	Butenos	68
3.3.3.	Olefinas superiores	72
3.3.3.1.	Olefinas superiores no ramificadas	73
3.3.3.2.	Olefinas superiores ramificadas	81
3.4.	Metátesis de olefinas	83
4.	Acetileno	87
4.1.	Importancia actual del acetileno	87
4.2.	Procesos de obtención de acetileno	90
4.2.1.	A base de carburo cálcico	90
4.2.2.	Procesos térmicos	91
4.3.	Aplicación del acetileno	94
5.	1.3-Diolefinas	99
5.1.	1.3-Butadieno:	99
5.1.1.	Síntesis históricas del 1.3-butadieno	100
5.1.2.	1.3-Butadieno de las fracciones C ₄ de craqueo	101
5.1.3.	1.3-Butadieno a partir de alcanos y alquenos C ₄	103
5.1.4.	Aplicaciones del 1.3-butadieno	106
5.2.	Isopreno	108
5.2.1.	Isopreno obtenido de las fracciones de craqueo C ₅	108
5.2.2.	Isopreno por reacciones de síntesis	109
5.3.	Cloropreno	113
5.4.	Ciclopentadieno	115
6.	Síntesis con monóxido de carbono	119
6.1.	Hidroformilación de olefinas	119
6.1.1.	Fundamentos químicos de la hidroformilación	120
6.1.2.	Sistema industrial de hidroformilación	123
6.1.3.	Variantes en la catálisis de la hidroformilación	126
6.1.4.	Aplicación de los productos oxo	128
6.1.4.1.	Alcoholes oxo	128
6.1.4.2.	Ácidos carboxílicos oxo	130
6.1.4.3.	Productos de aldolización y condensación de los aldehídos oxo	130
6.2.	Carbonilación de olefinas	132
6.3.	Síntesis de ácidos carboxílicos según Koch	134
7.	Productos de oxidación del etileno	137
7.1.	Óxido de etileno	138
7.1.1.	Óxido de etileno por el proceso de la clorhidrina	138
7.1.2.	Óxido de etileno por oxidación directa	139
7.1.2.1.	Fundamentos químicos	139
7.1.2.2.	Realización del proceso	140
7.1.2.3.	Posibilidades de desarrollo de la obtención de óxido de etileno	142

7.2.	Productos derivados del óxido de etileno	143
7.2.1.	Etilenglicol y etilenglicoles superiores	144
7.2.1.1.	Posibilidades de desarrollo de la obtención de etilenglicol	145
7.2.1.2.	Aplicaciones del etilenglicol	147
7.2.1.3.	Productos derivados: glioxal, dioxolano, 1,4-dioxano	147
7.2.2.	Polietoxilatos	149
7.2.3.	Etanolaminas y derivados	150
7.2.4.	Eteres glicólicos	152
7.2.5.	Carbonato de 1,2-glicol	154
7.3.	Acetaldehído	155
7.3.1.	Acetaldehído por oxidación de etileno	156
7.3.1.1.	Fundamentos químicos	156
7.3.1.2.	Realización del proceso	157
7.3.1.3.	Tendencias de mejoramiento	158
7.3.2.	Acetaldehído a partir de etanol	159
7.3.3.	Acetaldehído por oxidación de alcanos C ₃ /C ₄	160
7.4.	Productos derivados del acetaldehído	160
7.4.1.	Ácido acético	161
7.4.1.1.	Ácido acético por oxidación de acetaldehído	162
7.4.1.2.	Ácido acético por oxidación de alcanos y alquenos	164
7.4.1.3.	Ácido acético por carbonilación de metanol	167
7.4.1.4.	Posibilidades de desarrollo en la obtención del ácido acético	169
7.4.1.5.	Aplicaciones del ácido acético	170
7.4.2.	Anhídrido acético y cetena	171
7.4.3.	Condensación aldólica del acetaldehído y productos derivados	174
7.4.4.	Acetato de etilo	177
7.4.5.	Piridina y alcoholpiridinas	178
8.	Alcoholes	181
8.1.	Alcoholes inferiores	181
8.1.1.	Etanol	181
8.1.2.	Isopropanol	186
8.1.3.	Butanoles	189
8.1.4.	Alcoholes amfílicos	192
8.2.	Alcoholes superiores	193
8.2.1.	Alcoholes por oxidación de <i>n</i> -parafinas	196
8.2.2.	Síntesis Alfol	197
8.3.	Alcoholes polivalentes	199
8.3.1.	Pentaeritrita	199
8.3.2.	Trimetilolpropano	200
8.3.3.	Glicol neopentílico	201
9.	Combinaciones vinílicas halogenadas y oxigenadas	203
9.1.	Combinaciones vinílicas halogenadas	204
9.1.1.	Cloruro de vinilo	204
9.1.1.1.	Cloruro de vinilo a partir de acetileno	204
9.1.1.2.	Cloruro de vinilo a partir de etileno	205
9.1.1.3.	Posibilidades de desarrollo en la obtención de cloruro de vinilo	208

9.1.1.4.	Aplicación del cloruro de vinilo y 1.2-dicloroetano	209
9.1.2.	Cloruro de vinilideno	210
9.1.3.	Fluoruro de vinilo y fluoruro de vinilideno	210
9.1.4.	Tricloro- y tetracloroetileno	212
9.1.5.	Tetrafluoretileno	213
9.2.	Esteres y éteres vinílicos	214
9.2.1.	Acetato de vinilo	214
9.2.1.1.	Acetato de vinilo (Av) a partir de acetileno o de acetaldehído	215
9.2.1.2.	Acetato de vinilo a partir de etileno	216
9.2.2.	Ésteres vinílicos de ácidos carboxílicos superiores	219
9.2.3.	Éteres vinílicos	221
10.	Componentes para poliamidas	223
10.1.	Ácidos dicarboxílicos	225
10.1.1.	Ácido adípico vía ciclohexanol/ciclohexanona	226
10.1.2.	Ácido 1.12-dodecandioico	228
10.2.	Diaminas y aminoácidos	230
10.2.1.	Hexametilendiamina	230
10.2.1.1.	Obtención de adiponitrilo	230
10.2.1.2.	Hidrogenación del adiponitrilo	234
10.2.1.3.	Posibilidades de desarrollo de la obtención de adiponitrilo	235
10.2.2.	Ácido ω -aminoundecanoico	236
10.3.	Lactamas	237
10.3.1.	ϵ -Caprolactama	237
10.3.1.1.	ϵ -Caprolactama según la vía de la oxima de la ciclohexanona	237
10.3.1.2.	Otros posibles procesos de obtención de ϵ -caprolactama	242
10.3.1.3.	Posibilidades de mejora en la obtención de ϵ -caprolactama	244
10.3.1.4.	Aplicaciones de la ϵ -caprolactama	246
10.3.2.	Laurilactama	247
11.	Productos derivados del propeno	249
11.1.	Productos de la oxidación del propeno	250
11.1.1.	Óxido de propeno	250
11.1.1.1.	Óxido de propeno por el proceso de clorhidrina	251
11.1.1.2.	Óxido de propeno por procesos de oxidación indirecta	251
11.1.1.3.	Posibilidades de desarrollo de la obtención de óxido propeno	256
11.1.2.	Productos derivados del óxido de propeno	258
11.1.3.	Acetona	260
11.1.3.1.	Oxidación directa del propeno	261
11.1.3.2.	Acetona de isopropanol	262
11.1.4.	Productos derivados de la acetona	263
11.1.4.1.	Aldolización de la acetona y productos derivados	263
11.1.4.2.	Ácido y éster metacrílico	265
11.1.5.	Acroleína	268
11.1.6.	Derivados de la acroleína	269
11.1.7.	Ácido acrílico y sus ésteres	271
11.1.7.1.	Obtención histórica de ácido acrílico	271
11.1.7.2.	Ácido acrílico de propeno	273
11.1.7.3.	Posibilidades de desarrollo en la obtención de ácido acrílico	275

11.2.	Compuestos alílicos y productos derivados	276
11.2.1.	Cloruro de alilo	276
11.2.2.	Alcohol y ésteres alílicos	278
11.2.3.	Glicerina de precursores alílicos	281
11.3.	Acrilonitrilo	283
11.3.1.	Obtención histórica del acrilonitrilo	284
11.3.2.	Amonoxidación de propeno	285
11.3.2.1.	Proceso de Sohio para acrilonitrilo	286
11.3.2.2.	Otros procesos de amonoxidación de propeno (y propano)	288
11.3.3.	Aplicaciones del acrilonitrilo y productos derivados	289
12.	Aromáticos, obtención y transformación	293
12.1.	Importancia de los aromáticos	293
12.2.	Fuentes de materias primas para aromáticos	294
12.2.1.	Aromáticos de la coquización de hulla	295
12.2.2.	Aromáticos de pirólisis o de reformado de bencina	297
12.2.2.1.	Aislamiento de aromáticos	299
12.2.2.2.	Procesos de separación especiales para las mezclas de no aromáticos/aromáticos y las de aromáticos	300
12.2.3.	Aromáticos condensados	305
12.2.3.1.	Naftaleno	306
12.2.3.2.	Antraceno	307
12.3.	Procesos de transformación de aromáticos	310
12.3.1.	Hidrodeshidratación	310
12.3.2.	Isomerización de <i>m</i> -xileno	312
12.3.3.	Desproporcionamiento y transalcoholación	314
13.	Productos de transformación del benceno	317
13.1.	Productos de la alcoholación e hidrogenación del benceno	318
13.1.1.	Etilbenceno	318
13.1.2.	Estireno	328
13.1.3.	Cumeno	324
13.1.4.	Alcoholbencenos superiores	325
13.1.5.	Ciclohexano	327
13.2.	Productos de oxidación y secundarios del benceno	329
13.2.1.	Fenol	329
13.2.1.1.	Procesos de obtención del fenol	330
13.2.1.2.	Posibilidades de desarrollo en la obtención de fenol	337
13.2.1.3.	Aplicaciones del fenol y productos derivados	341
13.2.2.	Dihidroxibencenos	344
13.2.3.	Anhídrido maleico	348
13.2.3.1.	Anhídrido maleico por oxidación de benceno	349
13.2.3.2.	Anhídrido maleico por oxidación de buteno	350
13.2.3.3.	Posibilidades de mejoras en la obtención de anhídrido maleico	351
13.2.3.4.	Aplicaciones del anhídrido maleico y productos derivados	352
13.3.	Otros derivados del benceno	355
13.3.1.	Nitrobenceno	355
13.3.2.	Anilina	356
13.3.3.	Diisocianatos	359

14.	Productos de oxidación de xileno y naftaleno	365
14.1.	Anhídrido ftálico	365
14.1.1.	Oxidación de naftaleno a anhídrido ftálico	366
14.1.2.	Oxidación de <i>o</i> -xileno a anhídrido ftálico	367
14.1.3.	Ésteres del ácido ftálico	370
14.2.	Ácido tereftálico	372
14.3.	Obtención de dimetiltereftalato y ácido tereftálico	373
14.3.1.	Tereftalato de dimetilo	374
14.3.2.	Ácido tereftálico puro para fibras	376
14.3.3.	Otras vías de obtención de ácido tereftálico	378
14.4.	Aplicaciones del ácido tereftálico y del tereftalato de dimetilo	381
15.	Apéndice	385
15.1.	Esquemas de procesos y productos	385
15.2.	Definiciones de las magnitudes características de las reacciones	405
15.3.	Siglas de empresas	407
15.4.	Fuentes de información	407
15.4.1.	Obras de carácter general	408
15.4.2.	Obras de carácter especial	409
Índice alfabético		415

Capítulo 1

Perspectiva del acopio de materias primas y suministro de energía

La accesibilidad a fuentes de energía y materias primas y las consecuencias de sus precios, han determinado en todo tiempo la base teórica de la instauración o ampliación de la industria química. Pero la crisis del petróleo ha hecho necesario plantear de nuevo esta interdependencia y su importancia para la economía mundial ante la amplia opinión pública.

El carbón, el gas natural y el petróleo, que con la ayuda de la energía solar se han almacenado durante millones de años, tienen que proporcionarnos en nuestros días no sólo energía, sino también materias primas para cubrir nuestras necesidades.

En ningún sector de producción industrial es tan completa esta dependencia entre energía y materia prima como en la industria química, que se ve afectada por cualquier variación en la disponibilidad de las mismas, puesto que es la mayor consumidora de energía y también de reservas fósiles naturales, imposibles de regenerar, para ennobrecerlas, en la diversidad de productos de síntesis, que constituyen la variedad de productos de uso cotidiano con que nos beneficiamos.

Combustibles fósiles:
gas natural, petróleo, carbón
Tienen dos funciones:

1. Fuentes de energía
2. Materias primas para productos químicos

Metas a largo plazo para asegurar las necesidades de materias primas y de energía:

1. Aumento de las materias primas fósiles
2. Sustitución de los combustibles fósiles en el sector energético

La demanda creciente permanente y la limitada reserva de materias primas, apuntan cada vez con más claridad hacia la urgencia de asegurar para el futuro el abastecimiento tanto de energía como de materias primas.

Todos los esfuerzos a medio y a corto plazo deben concentrarse, por una parte, en el problema de poder ampliar la flexibilidad de la provisión de materias primas para la Química y, de otra, a satisfacer las demandas cada vez mayores del sector energético. A largo plazo debe intentarse el desacoplamiento de la inevitable doble función de los combustibles fósiles, para poder conservar el mayor tiempo posible tan imprescindible materia prima básica para su transformación en la industria química.

Para analizar adecuadamente el estado actual y comprender las futuras necesidades de fuentes energéticas primarias y materias primas, deben considerarse ambos aspectos dependientes de las fuentes de energía y estudiar cada una de éstas por separado.

1.1. Demanda presente y previsible de energía

Consumo de energía (en 10^9 toneladas de unidades equivalentes):

	Mundo	Europa occ.
1955	3,4	0,7
1975	8,8	1,3
1978	9,6	2,0

Las necesidades mundiales de energía en los últimos veinte años se han más que duplicado y en 1978 han alcanzado cotas del orden de $9,6 \cdot 10^9$ toneladas de unidades equivalentes [SKE = (Steinkohleneinheit) unidad carbón de piedra = 7 000 kcal = 29 300 kJ]. La media anual de crecimiento de consumo oscila alrededor del 4 % y su marcha es paralela al aumento del producto social bruto.

Para el mismo año y para Europa occidental el consumo de energía ha sido aproximadamente de $2,0 \cdot 10^9$ toneladas de unidades equivalentes, que se distribuyen así:

- 40 % en la industria
- 43 % en usos domésticos y pequeños usuarios
- 17 % en transportes y circulación

Consumo de energía de la Industria Química:

8 % del consumo total; la segunda consumidora de energía industrial

Cambios en la participación de las fuentes de energía primarias:

	Carbón	Petróleo
1950	60 %	25 %
1975	30 %	45 %
1978	30 %	45 %

En el consumo total de energía, la Industria Química participa con un 8 %, tras la Industria Siderúrgica, siendo ambas las más grandes consumidoras de energía industrial. En el período comprendido entre 1950 y 1975 la participación de las diferentes fuentes de energía en el gasto total de energía primaria se ha modificado considerablemente. Así, la participación del carbón con un 60 % en 1950, ha descendido al 30 % en 1975 continuadamente, mientras que la participación del petróleo ha aumentado paulatinamente desde el 25 % al 45 % en el mismo período en el consumo mundial de energía. Esta situación se mantuvo inalterada hasta 1978.

Hasta 1985 se prevé el mantenimiento de la supremacía

en proporción y valor absoluto del petróleo y gas natural como materias energéticas en el consumo global, seguidas por el carbón y la energía nuclear tan pronto como se lleve a cabo el programa sobre ésta.

Las causas de la supremacía del petróleo y gas natural sobre las otras fuentes de energía están relacionadas con lo razonables y económicas que son sus obtenciones, sus múltiples aplicaciones y lo barato que resulta su transporte y distribución.

Ante la tremenda elevación de los precios del petróleo y la urgencia en reducir la dependencia de esta materia prima, ha surgido la necesidad de buscar de nuevo en el futuro con más ahinco el consumo de carbón y la posible extracción de los combustibles líquidos que impregnan las arenas y pizarras bituminosas, hasta ahora no apreciadas. No se puede contar con una modificación decisiva del panorama básico de la energía en un tiempo inmediato, pues la reorientación tecnológica, por sus diversidades, exige un lapso de tiempo que hay que calcular en decenios, por lo que durante algún tiempo, más o menos largo, el petróleo seguirá siendo la principal fuente de energía.

1.2. Disponibilidades de cada fuente de energía

1.2.1. Petróleo

Las reservas de petróleo mundiales seguras y probables son por ahora del orden de 560 000 millones de toneladas de unidades equivalentes. De las cuales son válidas como seguras unos 130 000 millones de toneladas. De ellas corresponden el 56 % al Oriente Próximo, el 13 % al Bloque oriental, el 10 % a África, el 12 % a América, 6 % al Norte y 6 % al Sur, el 4 % a Europa occidental y el 3 % al Lejano Oriente. En estas cifras no se incluyen los aproximadamente 725 000 millones de toneladas de unidades equivalentes contenidas en las arenas y pizarras bituminosas.

Con todo lo cual hay que calcular sencillamente que, para finales de siglo, las reservas de petróleo quedarán reducidas a restos. Un aprovechamiento más racional de los yacimientos, que sólo obtienen el 30 % con los métodos de extracción actuales y una prospección más intensa de yacimientos, la revaloración de yacimientos de extracción difícil, el descubrimiento de nuevos yacimientos submarinos, así como una reestructuración del consumo de energía y materias primas, podrían hacer ampliar posiblemente este plazo de disponibilidad del petróleo.

Causas de la preferencia por el consumo de petróleo y gas natural como fuentes de energía:

1. Obtención racional
2. Aplicaciones múltiples
3. Costes de transporte y distribución baratos

Los cambios en los costos llevan a considerar otra vez como posibles fuentes de energía al carbón y a las arenas y pizarras bituminosas dentro del alcance económico

Reestructuración del consumo de energía. Sin embargo, imposible a plazo corto

El petróleo continúa siendo la principal fuente de energía

Reservas de petróleo (en miles de millones de toneladas de unidades equivalentes):
(1 tonelada de unidades equivalentes = 0,7 toneladas de petróleo):

Seguras	130
Total	560

Reservas en pizarras y arenas bituminosas (estimadas):

725 · 10⁹ toneladas de unidades equivalentes

Consumo de petróleo (en miles de millones de toneladas):

	1975	1978
Mundo	2,7	3,0
Europa occ.	0,65	0,68

Consumo mundial acumulado de petróleo entre 1950-1975: 38 000 millones de toneladas

Caso de consumo igual, agotamiento de las reservas seguras conocidas hoy en unos 35 años

Reservas de gas natural (en miles de millones de toneladas de unidades equivalentes):

Seguras	72
Total	400

Caso de consumo igual, agotamiento de las reservas conocidas actualmente en unos 40 años

Rápida expansión del consumo de gas natural por la posibilidad de transporte a gran distancia mediante:

1. Gaseoductos
2. Barcos especiales
3. Transformación en metanol

Sustitución del gas natural por gas natural de síntesis no antes de 1990 (ver «Producción de gas natural de síntesis SNG», apartado 2.1.2)

Reservas de carbón (en miles de millones de toneladas de unidades equivalentes):

Seguras	460
Total	6700

1.2.2. Gas natural

Las reservas mundiales seguras y probables de gas natural son menores que las del petróleo y se estiman en unos 400 000 millones de toneladas de unidades equivalentes, de los cuales 63 billones de m³ o 72 000 millones de toneladas de unidades equivalentes son reservas seguras.

Se distribuyen así: el 38 % al Bloque oriental, el 24 % al Oriente Próximo, el 13 % a Norteamérica, el 9 % a África y el 8 % a Europa occidental. Los yacimientos de gas natural en Holanda y en el Mar del Norte, desgraciadamente no son más que reservas de alivio; las reservas alumbradas de gas natural en el Mar del Norte se cifran en 2 billones de m³. A la República Federal Alemana corresponde una reserva segura de unos 300 mil millones de m³ = 340 millones de toneladas de unidades equivalentes.

En el transcurso de las dos últimas décadas el consumo de gas natural ha ido aumentando continuamente. Hasta entonces el gas natural sólo se podía utilizar donde existía la adecuada infraestructura industrial o podía soslayarse el alejamiento del consumidor por medio de gaseoductos. Mientras tanto, pueden también beneficiarse los lugares alejados del de extracción, gracias a la licuefacción del gas natural y su transporte en barcos especiales y también por transformación en metanol obtenido con gas de síntesis, con lo que hay que añadir a su precio los costos de transformación.

Por lo cual hay que contar ya que en los próximos años va a aumentar considerablemente el consumo de gas natural, teniendo también en cuenta la tendencia a diversificar las fuentes energéticas primarias.

La dependencia como importadores va por tanto a incrementarse en los países pobres en gas natural. Es pues con la instalación o la ampliación de instalaciones de gas de síntesis, a base de carbón o de lignitos, que puede aliviarse este pronóstico. Esto no parece que se pueda alcanzar, en gran parte, antes de 1990.

1.2.3. Carbón

De las reservas que hemos expuesto son las del carbón las más ampliamente repartidas y la fuente de energía más importante, aun cuando hay que hacer notar que las estimaciones de reservas de disponibilidad de carbón son apreciaciones geológicas, sin tener en cuenta su explotabilidad. Las reservas de carbón mundiales seguras y probables se estiman en 6,7 billones de toneladas de unidades equivalentes, de las cuales se dan como seguras 0,46

billones de toneladas. De estas reservas corresponden al Bloque oriental el 40 %, a Norteamérica el 25 %, a Europa occidental el 20 % y a África el 9 %. En las condiciones económicas y técnicas actuales las cantidades de carbón explotables en la República Federal Alemana alcanzan unos 24 000 millones de toneladas, con una extracción de 92 millones de toneladas el año 1975.

Las reservas de lignitos mundiales se estiman en unos 700 000 millones de toneladas de unidades equivalentes, de las cuales se consideran como seguras 167 000 millones de toneladas. Las existentes en Europa occidental son apenas de unos 20 000 millones de toneladas, de las cuales 16 000 millones corresponden a la República Federal Alemana.

Según un estudio realizado por encargo de la ONU, en el año 2000 se habrá consumido el 2 % de las existencias de lignitos y hullas mundiales. Con las enormes reservas de carbón se pueden cubrir a largo plazo las necesidades energéticas del mundo.

1.2.4. Combustibles nucleares

La energía nuclear es, por su estado actual de desarrollo, la única solución realista para el problema de suministro de energía para las próximas décadas; su economía está comprobada.

Los combustibles nucleares proporcionan para los sectores energéticos más importantes, sobre todo para la producción de energía eléctrica, la alternativa de las fuentes de energía fósiles. Las existencias de uranio y torio son grandes y están distribuidas por amplias zonas de la Tierra. Entre las clases de precio bajo y medio se cuenta con unas reservas seguras y probables de uranio de 4,0 millones de toneladas (de ellas 2,2 millones como seguras); las reservas correspondientes al torio deben estar por los 2,2 millones de toneladas.

Con el uso del uranio en los reactores de agua ligera, del tipo que actualmente se construye, en los que sólo se aprovecha el U-235, contenido en un 0,7 % en el uranio natural, se alcanzan por combustión unos 1000 MWd/kg de U-235 y, consiguientemente, para 4 millones de toneladas de uranio, unos 80 000 millones de toneladas de unidades equivalentes. Por aprovechamiento completo del uranio mediante reactores rápidos de incubación se puede elevar considerablemente la producción, como a unos 10 billones de toneladas de unidades equivalentes. Además, puede aumentarse en 5,4 billones de toneladas de unidades equivalentes si las mencionadas reservas de torio se emplean en reactores de incubación. Por estos números

Reservas de lignito (en miles de millones de toneladas de unidades equivalentes):

Seguras	167
Total	700

Consumo de carbón esperado hasta el año 2000: el 2 % de las reservas mundiales

Reservas de combustibles nucleares (en millones de toneladas):

	Uranio	Torio
Seguras	2,2	
Total	4,0	2,2

Contenido energético de las reservas de uranio (en miles de millones de toneladas de unidades equivalentes):

80 con la tecnología actual
10 000 por completo aprovechamiento en reactores de incubación

Funcionamiento básico del reactor de incubación rápido (captura de neutrones):

U-238 → Pu-239

Th-232 → U-233

Generaciones de reactores:

De agua ligera

De alta temperatura

De incubación

Ventaja de los reactores de alta temperatura:

El calor del proceso se puede utilizar para reacciones químicas fuertemente endotérmicas a niveles de temperatura altos (900-1000°C)

Previsiones necesarias para el empleo de la energía nuclear:

1. Abastecimiento de combustibles nucleares asegurado
2. Centrales nucleares técnicamente seguras
3. Eliminación segura de los productos de escisión o fisión

Consumo mundial acumulado, estimado en unos 400 000 millones de toneladas de unidades equivalentes entre 1975-2000, asegurado por las reservas de energía

puede medirse la importancia de los incubadores rápidos. Su forma de actuar consiste en que el U-238, que no es fisible por la acción de neutrones térmicos, se transforma por inclusión de neutrones en el núclido Pu-239 fisible (el núclido U-238 no fisible es el componente principal del uranio natural, su proporción es del 99,3 %) y, respectivamente, a partir del Th-232 se obtiene el núclido fisible U-233.

Con el actual nivel de tecnología de reactores las crecientes necesidades de energía se podrían cubrir por lo menos para 50 años. El tipo de reactor dominante en la actualidad y seguramente en los próximos 20 años, es el reactor de agua ligera (reactor de vapor de agua a ebullición o a presión) que funciona a unos 300°C. También los reactores de alta temperatura, con refrigeración hasta próximos los 1000°C (helio), están ya en el pódico de su realización técnica. Su ventaja debe tenerse en cuenta porque además de la producción de energía eléctrica también se puede aplicar a procesos térmicos a altas temperaturas (ver apartados 2.1.1 y 2.2.2). Los reactores de incubación, para poder disponer de ellos como instalaciones energéticas comerciales, habrá que esperar como mínimo a los años 90, puesto que su desarrollo exige aún solucionar algunos problemas tecnológicos.

Es importante, y por ello hay que considerarlo, que la seguridad de abastecimiento de países con grave dependencia de la importación de energía (como, p. ej., Alemania) tiene que hacerse por almacenamiento de combustibles nucleares, que por su elevado contenido energético proporcionan grandes reservas. Las previsiones para el empleo eficaz de la energía nuclear no sólo precisan de una central nuclear segura y de confianza, sino que hay que llegar a cerrar sin solución de continuidad el ciclo del combustible nuclear, empezando por el abastecimiento de uranio natural, su preparación y las instalaciones para enriquecimiento con capacidades adecuadas y terminar con la eliminación de los productos radiactivos residuales y la reciclación de los combustibles nucleares no aprovechados y los incubados.

La eliminación de residuos de las instalaciones nucleares puede ser un factor determinante del tiempo necesario para la realización del programa energético.

1.3. Perspectivas de abastecimiento energético futuro

Una estimación del consumo de energía mundial por año nos lleva al resultado de que, aun renunciando a la energía nuclear, se puede cubrir en cantidad el consumo hasta

mucho después del año 2000. Y éste es también el caso si para los próximos 25 años se prevé un ritmo de aumento anual del 3% o más en el consumo de energía (ver tabla 1-1).

Tabla 1-1. Reservas mundiales de energía y consumo hasta el año 2000

Fuente de energía	Reservas mundiales seguras y probables (10 ⁹ ton unid. eq.)	Consumo anual 1975 (10 ⁹ ton unid. eq.)	Consumo acumulado desde 1975 a 2000*) (10 ⁹ ton unid. eq.)	% reservas
Petróleo	560	3.9	150	27
Arenas/pizarras bituminosas	600	0	desconocido	-
Gas natural	400	1.8	68	17
Hulla	6 700	2.2	82	1.2
Lignitos	700	0.4	15	2.1
Uranio (incubado)	10 000	0.2	60	0.6
Torio (incubado)	5 400	0	3	0.1

*) Previsiones: Petróleo, gas natural, carbón: aumento anual + 3%.
Energía nuclear: estimación por el estudio de la ONU.

A diferencia de lo que sucede con el carbón, hay que contar con el agotamiento de las reservas de gas natural y petróleo preferidas por la industria química como materia prima, si no se consigue, antes del año 2000, una reestructuración fundamental del consumo de energía. Esta situación apenas variará a largo plazo, aunque se logre el beneficio de las arenas y pizarras bituminosas. La sustitución del petróleo y del gas natural por otras fuentes de energía es la única vía con completo sentido para resolver el dilema, y de esta forma conservar al máximo los valiosos productos fósiles naturales.

La progresiva disminución de las reservas de petróleo y de gas natural forzarán a modificar la escala de precios de las fuentes de energía fósiles. Para el paulatino abandono del consumo de energía proporcionado por combustibles fósiles puede ser decisivo, a medio plazo, el empleo de la energía nuclear. Puede decirse que la energía solar proporciona reservas inagotables, de cuya potencial posibilidad de empleo industrial sólo haremos algunas consideraciones. Expresado en unidades equivalentes, la energía solar irradiada a la Tierra anualmente corresponde aproximadamente a 30 veces las existencias de hulla en el mundo. Teóricamente, por simple cálculo, con sólo el 0,005% de la energía recibida del Sol podría cubrirse el consumo de energía mundial. El desarrollo de colecto-

En función de la actual estructura del consumo es previsible un agotamiento del petróleo y del gas natural

Sustitución de combustibles fósiles en la producción de energía por el posible empleo de:

1. Energía nuclear (medio plazo)
2. Energía solar (largo plazo)
3. Energía geotérmica (parcial)
4. Energía de fusión de núcleos (largo plazo)

res solares y sistemas de células solares es, por tanto, una tarea de orden primordial. Simultáneamente hay que resolver los problemas del almacenamiento y transporte de esta energía.

El aprovechamiento en gran proporción de las llamadas energías sin fin, en las que se incluyen además de la energía solar también la geotérmica y la de fusión nuclear, alcanzarán en un próximo futuro una importancia creciente. Hasta entonces debe considerarse como asunto primordial el uso más adecuado de las materias primas fósiles, en especial el petróleo. Para conservarlo el mayor tiempo posible, hay que constituir, lo más pronto posible, como pilares en qué basar el aprovisionamiento de energía, la nuclear y el carbón. La energía nuclear debe ampliar cada vez más su radio de acción en la producción de electricidad, mientras que el carbón debe ampliar su campo de aplicación sustituyendo a los productos petrolíferos.

Antes de que las fuentes de energía fósiles se liberen de la servidumbre del suministro de energía, lo que seguramente no será posible hasta el próximo siglo, sería una posible combinación de energía nuclear y carbón en grandes cantidades la que soportaría la carga en su mayoría. La aplicación de procesos nucleares térmicos para la gasificación del carbón puede hacer posible un mayor empleo de productos derivados del gas de síntesis (ver apartado 2.1.1).

Junto a la obtención de gas de síntesis por gasificación de carbón puede también aplicarse la energía nuclear eventualmente para la obtención de hidrógeno a partir de agua por electrólisis de vapor de agua a temperatura elevada o por un proceso químico cíclico. Esto nos puede llevar a un amplio incremento del hidrógeno como combustible (tecnología del hidrógeno) y a la industria química a la liberación de las materias primas fósiles en la producción de hidrógeno (ver apartado 2.2.2).

Esta fase de desarrollo nos llevará cada vez más a un sistema en el que la energía se obtenga de fuentes regenerables y el carbón y el petróleo sólo conserven el carácter de materias primas para su transformación química.

Posible sustitución del petróleo en la producción de energía por empleo de:

1. Carbón
2. Energía nuclear
3. Combinación de energías de carbón y nuclear
4. Hidrógeno

Meta a largo plazo:

Abastecimiento de energía de fuentes regenerables exclusivamente y abastecimiento de materias primas de fuentes fósiles

Modificaciones características de la base de materias primas en la industria química:

Productos básicos hasta 1950:

1. Gasificación de carbón (productos de coque, gas de síntesis)
2. Acetileno de carburo cálcico

1.4. Estado actual y previsible de las materias primas

El estado actual de las materias primas en la Química industrial se ha caracterizado por la sustitución de la tecnología del carbón por la del petróleo. Esta reestructuración implica también el cambio de la tecnología del acetileno a la de las olefinas (ver apartado 3.1, «Desarro-

llo histórico de la química de las olefinas», y apartado 4.1, «Importancia actual del acetileno»).

1.4.1. Productos primarios petrolquímicos

De los procesos para la obtención de productos químicos básicos de los años cincuenta a partir del carbón, los únicos que continúan son la preparación de monóxido de carbono e hidrógeno por el método de gasificación, así como la obtención de carburo cálcico (para el sector de soldaduras y algunos determinados productos intermedios), el benceno y algunos compuestos aromáticos polinucleares, que forman una parte muy pequeña en comparación con los productos primarios básicos obtenidos por la petrolquímica, que ascendían al 95 % en 1975. Es indudable que la amplitud alcanzada en la producción de productos básicos primarios en los últimos veinte años para obtener productos orgánicos elaborados (su crecimiento fue, p. ej., en la República Federal Alemana de 1,1 millón de toneladas en 1957 a ocho veces más en el año 1973) no se podría haber alcanzado sin el empleo del petróleo. Las máximas disponibilidades ponderables de carbón no hubiesen permitido un desarrollo tan rápido y grande. Esto nos puede hacer comprender que también en tiempos venideros será necesario una paulatina y parcial sustitución del petróleo por el carbón, con las miras de ampliación de la base de materias primas para que se llegue a realizar, ya que la dependencia de la industria química del petróleo tiene que permanecer durante algún tiempo.

De las materias primas que las refinerías de petróleo ponen a disposición de la industria química en Europa es la gasolina, con creces, la más importante. Por craking de la misma se obtienen olefinas como el etileno, propeno, buteno y butadieno, así como aromáticos como el benceno, tolueno y xiloles. Ya más distanciados siguen el fueloil para calefacciones y el gas de refinerías, que junto con el gas natural se dedican a la obtención de gas de síntesis. Éste constituye la base para la obtención de amoniaco, metanol y productos oxo. En la industria química, el consumo de gasolina bruta o nafta en la República Federal Alemana alcanzó en el año 1976 los 12,5 millones de toneladas, el consumo de gas natural 1 100 millones de m³ y el consumo de fueloil pesado 1,3 millones de toneladas. Puesto que la simple destilación a presión ordinaria del petróleo proporciona solamente del 20 al 25 % de nafta, este consumo de gasolina bruta corresponde a una cantidad de unos 60-70 millones de toneladas de petróleo bruto. El porcentaje del 7-10 % atribuido frecuentemente a la participación correspondiente de la industria

Productos básicos a partir de 1950:

1. Productos de elaboración del petróleo
2. Gas natural
3. Productos de gasificación de carbón, así como acetileno de carburo y de hidrocarburos inferiores

La expansión de productos químicos primarios orgánicos fue sólo posible por el cambio de carbón a petróleo

La vuelta al carbón para productos primarios orgánicos no es posible realizarla a plazo corto o medio

Productos empleados para olefinas y aromáticos:

Europa: Nafta (bencina bruta)
EE.UU.: Gas condensable (C₂-C₄) aumentando nafta

Productos empleados para gas de síntesis (CO + H₂):

Metano e hidrocarburos superiores

Consumo de materias primas por la Química en la República Federal Alemana:

	1974	1975	1976	
Nafta	} ¹⁾	13.5	9.3	12.5
Fueloil ligero				
Fueloil pesado ¹⁾	1.2	1.1	1.3	
Gas natural ²⁾	0.9	0.9	1.1	

¹⁾ En millones de toneladas

²⁾ En 1000 millones de m³

La producción de nafta en la elaboración del petróleo bruto depende fuertemente de la estructura de la refinería:

En la elaboración convencional, el 20 %

Con conversión de subproductos por hidrocraqueo, el 55 %

química en el consumo total de petróleo, formalmente es correcto, pero no demuestra la verdadera dependencia de la industria química con respecto al petróleo. Sobre rendimiento y composición de las fracciones de destilación de las refinerías, ejercen una influencia decisiva los métodos de trabajo utilizados en las mismas, que diferencian a las distintas instalaciones de refinamiento. Las instalaciones con rendimiento elevado en nafta, por ejemplo, disponen de refinamiento por hidrocraqueo, mientras que otras están dispuestas para obtener en proporción elevada fueloil.

En este sentido, los ejemplos extremos están representados por los EE.UU. y la República Federal Alemana a causa de la diferente demanda de sus mercados:

Tabla 1-2. Distribución de productos de refinería en EE.UU./RFA (en peso %).

Fracción	EE.UU.		RFA		
	1974	1975	1974	1975	1978
Gas/Gas condensable	12	10	7	4	4
Gasolina motores/Nafta	55	50	19	22	19
Fueloil ligero, aceite Diesel, aceite engrase	25	25	39	39	42
Fueloil pesado, Betún, coque residual	8	15	35	35	35
Total productos refinería (en millones ton)	599	580	106	84	98

Empleo de nafta:

35-40 % para transformación en productos químicos primarios

60-65 % gasolina para motores

Alternativas para cubrir las necesidades de productos petrolquímicos de los productos de refinerías:

1. Mayor empleo de productos adicionales obtenidos por hidrocraqueo y conversión de productos residuales
2. Ampliación del intervalo de temperaturas de las fracciones de los productos destinados al cracking
3. Ahorro de fueloil para el sector energético, substituyéndolo por carbón en las calefacciones

El desarrollo de consumo diferenciado de productos del petróleo debe acentuarse regionalmente por la creciente introducción del carbón en sustitución del fueloil.

En la República Federal Alemana se destina actualmente para su transformación química del 35 al 40 % del consumo de nafta nacional y del 60 al 65 % para el sector energético. Para el futuro se espera un crecimiento más rápido del consumo de materias primas para la obtención de productos petrolquímicos, que el porcentaje de aumento en el consumo de gasolina y fueloil pesado. Esta situación que pone en evidencia la estrecha servidumbre entre disponibilidad y consumo de cada una de las fracciones de los productos de refinería, da por resultado una segura y cada vez más variada preparación de productos primarios petrolquímicos distribuidos por importancia en las siguientes posibilidades de desarrollo:

1. Ampliación de las tecnologías de manipulación de los productos del petróleo bruto.
2. Ensanchamiento de las fracciones de destilación destinadas a obtener productos químicos primarios.

3. Separación y consiguiente disminución de la doble función del petróleo como producto energético y como materia prima.

Para 1:

Las tecnologías de manipulación de las refinerías de Europa occidental están orientadas preferentemente a la obtención de gasolina bruta por destilación. Las instalaciones para conversión por transformación de fracciones pesadas en bencina, como por hidrocracking, no desempeñan hasta ahora, al contrario que en los EE.UU., un papel impor-

Para 1:

Reestructuración de las refinerías incorporando preferiblemente instalaciones de conversión adicionales como:

1. Hidrocraqueo
2. Termocraqueo
3. Craqueo catalítico

Tabla 1-3. Obtención de productos petroquímicos según la materia prima empleada y la estructura de la refinería.

Producto empleado	Nafta	Nafta + Gasoil	Nafta + Gasoil + Gasoil de vacío	Nafta + Gasoil + Gasoil de vacío
Instalación de conversión	-	-	Craqueo cat. ¹⁾	Hidrocraqueo + reconversión de residuos
Rendimiento referido a cantidad de petróleo (en peso %)				
Etileno	8.7	16.1	18.9	26.0
Propeno	4.6	9.1	12.9	15.0
Butadieno	1.5	2.8	3.1	4.6
Aromáticos	4.9	8.2	14.4	13.9
Productos petroquímicos totales	19.7	36.2	49.3	59.5
Gasolina	2.3	3.9	8.4	6.4
Fueloil	69.8	47.6	22.6	12.6
Costos de inversión ²⁾ (Índice de referencia) ³⁾	100	130	165	198
Costos de producción/ton de crudo (Índice de referencia) ³⁾	100	135	169	209

Aclaraciones: ¹⁾ Proceso FCC (Fluid-Catalytic-Cracking: Craqueo catalítico fluido).

²⁾ Referido a una media de 2,5 millones ton año de crudo.

³⁾ Costes de capital y de producción con relación a las instalaciones convencionales de nafta situadas en los EE.UU. en la costa del Golfo (Índice = 100, diciembre 1974).

Características más importantes de las instalaciones de hidrocrackeo:

Altos costes de inversión
Consumo elevado de hidrógeno

Para 2:

La aplicación al craqueo de fracciones de ebullición más alta que la nafta, da origen a productos de composición diferente

Rendimiento típico en olefinas en los procesos de craqueo (en % en peso):

	Nafta	Gasoil
Etileno	28	20
Propeno	13,5	14
Butadieno	4	4
C ₄ -olefinas	4,5	5

Residuos: gas de combustible, bencina de cracking, aceite residual

Por ahora, en los EE.UU., la materia básica preferida para las olefinas son los hidrocarburos de ebullición baja (gas natural húmedo)

tante. En la RFA se ha puesto en marcha en Wintershall (BASF), en 1977, el primer hidrocracking según el proceso de la Union Oil con un promedio anual de producto procesado de un millón de toneladas. El cambio hacia estas tecnologías está gravado con considerables inversiones y costos de instalación que, a su vez, exigen instalaciones adicionales para cubrir los elevados consumos de hidrógeno, puesto que las cantidades de hidrógeno que proporcionan las refinerías convencionales no son suficientes. Consideraciones análogas son válidas para otras instalaciones de conversión, como, por ejemplo, las de craqueo térmico o catalítico.

Para 2:

Una mayor oferta de productos brutos petroquímicos se consigue también por empleo adicional de gasoil, además de la nafta que actualmente se usa. Así vemos que, en efecto, el rendimiento en olefinas C₂-C₄ que es de un 50 % a partir de nafta, desciende al 40-43 % en las obtenidas a partir de gasoil, y a la vez se modifica la composición en olefinas; en especial, disminuye el porcentaje del producto principal, del etileno. Pero si consideramos la cantidad de petróleo sometida a transformación, resulta globalmente una elevación del rendimiento en productos petroquímicos. Así, como la tabla 1-3 indica, en el caso óptimo de aprovechamiento de nafta, gasoil de presión normal y de vacío, y reconversión de residuos con hidrocrackeo, puede elevarse la proporción de productos petroquímicos desde un 20 % a un 60 % en peso, referido al petróleo utilizado.

Otra base de materias primas, aun cuando también limitada, puede resultar de la obtención de etano, propano y butano a partir del denominado «gas natural húmedo». Algunas de las fuentes en que se puede pensar para esto son, junto al gas del Mar del Norte y el gas natural de Argelia, los de Irán y Arabia Saudí, cuyos contenidos en fracción gaseosa C₂-C₄ aumentan en la secuencia que se cita (tabla 1-4).

Tabla 1-4. Composición típica del gas natural de procedencias distintas (en % en peso).

Procedencia	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Mar del Norte (Ekofisk)	90.8	6.1	0.7	0.1
Argelia	86.9	9.0	2.6	1.2
Irán	74.9	13.0	7.2	3.1
Arabia Saudí	48.1	18.6	11.7	4.6

Sin embargo, sigue siendo decisivo para la industria química asegurar a largo plazo las materias primas básicas, sobre todo el abastecimiento de un producto tan óptimo como es la nafta, para poder seguir siendo proveedora de muchas otras ramas industriales. Así los productos de disociación de nafta y sus derivados en la República Federal Alemana se usan aproximadamente en un 50 % para obtención de materias plásticas y alrededor del 10 % para fibras sintéticas. El resto se distribuye entre los restantes campos de la química.

Para 3:

La tercera posibilidad de conservar el petróleo para su empleo en la industria química reside, por una parte, en la elevación del rendimiento en la transformación del petróleo en electricidad, calor y energía mecánica, y, por otra parte, en desmembrar su doble función de proveedor de energía y de materia prima.

Estos problemas son un reto evidente a la ciencia y a la técnica.

Así, en el campo industrial, sólo un 55 % de la energía se aprovecha efectivamente en la actualidad. Para servicio doméstico y pequeños usuarios, que representan la mayor parte y en continuo aumento del campo de consumo, sólo lo hacen hasta ahora en el 45 % y en circulación incluso sólo en el 17 %. El resto se pierde en transformaciones, transportes y pérdidas de calor.

De influencia mucho más grande puede ser, sin embargo, la paulatina sustitución del petróleo, en la producción de energía, por el carbón y energía nuclear (ver apartado 1.3, «Perspectivas de abastecimiento energético futuro»). También se incluye en esto la parcial o completa sustitución de la gasolina para vehículos por metanol (ver apartado 2.3.1.2, «Posibilidades de aplicación del metanol»).

1.4.2. Productos de la refinación del carbón

La industria química alemana utiliza actualmente el carbón en volumen apreciable únicamente como materia prima para la obtención de benceno, naftaleno y antraceno, así como en menores cantidades para la de acetileno y monóxido de carbono, lo que corresponde a una participación del 5 % en la industria de productos químicos orgánicos. Si añadimos a esto su condición de materia prima para la obtención de carbono técnico (negro de humo, grafito), se llega a una participación del 13 % aproximadamente.

Empleo de los productos de disociación de nafta y sus derivados:

- 50 % materias plásticas
- 10 % fibras sintéticas
- El resto en otros campos

Para 3:

Ahorro de petróleo, como proveedor de energía, posible por distintos caminos:

1. Elevación de la convertibilidad efectiva del petróleo en energía
2. Paulatina sustitución por carbón y, respectivamente, por energía nuclear
3. Paulatina sustitución como carburante, por ejemplo, por metanol

Carbón como materia prima en la industria química:

Por el momento sólo para el 5 % de los productos orgánicos primarios

Sustitución del petróleo por perfeccionamiento de procesos de gasificación y elaboración del carbón

Necesario precios muy bajos del carbón

El carbón se mantiene, sin embargo, como la única alternativa de sustitución del petróleo

Procesos de la química del carbón:

1. Gasificación
2. Hidrogenación (extracción hidrogenante)
3. Destilación
4. Obtención de acetileno (carburo cálcico)

Están desarrollándose nuevas tecnologías combinadas para gasificar el carbón con acoplamiento a procesos térmicos

La fuerte variación del mercado del petróleo permite preguntarse sobre la importancia de la posible sustitución de los productos primarios y derivados de la petrolquímica por posibles productos de la elaboración del carbón. En general, por procedimientos ya conocidos podrían volver a obtenerse a partir del carbón los productos orgánicos primarios derivados del petróleo. Su preparación, por supuesto, está condicionada a que el precio del carbón con respecto al petróleo o gas natural sea mucho más bajo. En Europa, e incluso en los EE.UU. donde los precios del carbón son relativamente bajos, todavía no es rentable la obtención de bencina.

No obstante, considerado a largo plazo, el carbón constituye la única alternativa formal frente al petróleo como materia prima. Teniendo en cuenta la actual estructura de producción de la petrolquímica y con el fin de elevar la rentabilidad, debe tenderse a desarrollar y mejorar las anteriores y valiosas tecnologías para aumentar los rendimientos específicos de los valiosos productos que se obtienen con esos procesos.

Para la obtención de productos químicos de partida, se dispone, fundamentalmente para el carbón, de las siguientes vías:

1. Gasificación de lignitos o hullas para obtener gas de síntesis y transformarlo en productos químicos básicos (ver apartado 2.1.1.1).
2. Hidrogenación o extracción hidrogenante de hulla.
3. Destilación de lignitos o hullas.
4. Reacción del carbón con óxido de cal para obtener carburo cálcico y transformarlo en acetileno:

En detalle se informará en los capítulos siguientes sobre el estado actual de la técnica y posibilidades de nuevo desarrollo.

En el futuro, los procesos térmicos nucleares pueden impulsar la gasificación del carbón, que precisa de cantidades enormes de calor.

El uso de los procesos térmicos nucleares en la industria química consiste en aprovechar directamente la energía liberada en los reactores nucleares, es decir, sin transformación en corriente eléctrica para realizar las reacciones químicas. Este acoplamiento de los procesos térmicos nucleares con las reacciones químicas sólo es posible en determinadas condiciones. En los reactores de agua ligera las temperaturas son del orden de hasta 300°C. Su aplicación se limita principalmente a la producción de vapor. Muy diferente es, por el contrario, la producción de los reactores de temperatura alta, en los que se alcanzan