



Fundación de la Energía de  
la Comunidad de Madrid

Energy Management Agency

Intelligent Energy Europe

[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)



de Áridos

Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Canteras

# Guía de Ahorro y Eficiencia Energética



## en Canteras de Áridos



Madrid Vive Ahorrando Energía



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA,  
TURISMO  
Y COMERCIO



Medida de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética para España (2004/2012) puesta en marcha por la Comunidad de Madrid, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA  
**Comunidad de Madrid**  
[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

**MM**  
La Suma de Todos

# Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Explotaciones de Áridos

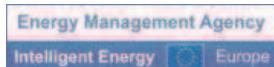


Madrid Ahorra con Energía

Madrid, 2011



Fundación de la Energía de  
la Comunidad de Madrid



[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA  
**Comunidad de Madrid**  
[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

Esta Guía se puede descargar en formato pdf desde la sección de publicaciones de las páginas web:

[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

(Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas)

[www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)

Si desea recibir ejemplares de esta publicación en formato papel puede contactar con:

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid

[dgtecnico@madrid.org](mailto:dgtecnico@madrid.org)

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

[fundacion@fenercom.com](mailto:fundacion@fenercom.com)

La Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, respetuosa con la libertad intelectual de sus colaboradores, reproduce los originales que se le entregan, pero no se identifica necesariamente con las ideas y opiniones que en ellos se exponen y, por tanto, no asume responsabilidad alguna de la información contenida en esta publicación.

La Comunidad de Madrid y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, no se hacen responsables de las opiniones, imágenes, textos y trabajos de los autores de esta guía.

Depósito Legal: M.

Imprime: Gráficas Arias Montano, S. A.  
28935 MÓSTOLES (Madrid)

Esta guía ha sido realizada por iniciativa de la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Consejería de Economía y Hacienda y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

La elaboración técnica ha sido encomendada a la empresa Alba Ingenieros Consultores, S.L.

# Presentación

La mejora de la eficiencia energética en las canteras se debe abordar con un enfoque sistemático, ya que todo el proceso de producción está integrado por un conjunto de operaciones que, si bien pueden parecer independientes unas de otras, están interrelacionadas entre sí.

En cualquier explotación minera, el consumo de energía constituye una partida importante de los costes de producción, siendo notable el potencial de ahorro que existe.

Por otro lado, los tipos de energía son diferentes en función de las características de los materiales extraídos, tipos de maquinaria utilizada y sistemas de abastecimiento.

En este contexto, la Consejería de Economía y Hacienda, en colaboración con la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, y dentro de la campaña **Madrid Ahorra con Energía**, han decidido publicar esta Guía, en la que se expone la metodología para reducir el consumo global de energía en las canteras, así como la tecnología disponible para conseguir dicho fin en las distintas fases del ciclo de producción, con el objetivo de hacer más competitiva a la industria extractiva.

**Carlos López Jimeno**

Director General de Industria, Energía y Minas



# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	11
<b>Capítulo 2. Antecedentes, objetivos y alcance de la guía</b>	15
<b>Capítulo 3. Conceptos generales de energía, ahorro y eficiencia energética</b>	19
3.1. Energía. Tipos y medida	19
3.2. Ahorro y eficiencia energética	22
<b>Capítulo 4. Breve revisión del panorama energético</b>	25
4.1. Tendencia actual en el consumo energético nacional	25
4.2. Situación energética de la Comunidad de Madrid	32
4.3. Consumo de energía en el sector industrial	37
4.3.1. El sector industrial en España	37
4.3.2. El consumo energético de las industrias de la Comunidad de Madrid	41
4.4. Actuaciones institucionales en ahorro y eficiencia energética en el sector industrial madrileño	43
<b>Capítulo 5. La energía en las explotaciones mineras de la Comunidad de Madrid</b>	49
5.1. La minería en la Comunidad de Madrid	49
5.2. Energía consumida por las explotaciones mineras madrileñas	53
<b>Capítulo 6. Evaluación de los aspectos energéticos en las canteras de áridos</b>	57
6.1. Consumo de energía	57
6.2. Eficiencia energética en canteras	64
6.3. Mejora de la eficiencia energética en canteras	68

6.3.1.	Optimización del ciclo de producción a través de la fragmentación de las voladuras	70
6.3.1.1.	Perforación	72
6.3.1.2.	Voladura	76
6.3.1.3.	Carga	82
6.3.1.4.	Transporte	91
6.3.1.5.	Trituración y molienda	92
6.3.2.	Optimización del sistema de explotación	94
6.3.2.1.	Transporte	100
6.3.2.2.	Trituración y clasificación	114
6.3.2.3.	Plantas fijas, semimóviles y móviles	121
6.3.2.4.	Tratamiento por vía húmeda	121
6.3.2.5.	Almacenamiento de productos finales	124
6.3.2.6.	Tratamiento de aguas de proceso	125
6.3.2.7.	Consumos energéticos	126
6.3.3.	Incorporación de nuevas tecnologías	129
<b>Capítulo 7.</b>	<b>Medidas de ahorro y eficiencia energética y buenas prácticas en la fabricación de áridos en la Comunidad de Madrid</b>	143
7.1.	Ahorro de energía eléctrica	143
7.2.	Ahorro y eficiencia energética en el arranque con explosivos	145
7.3.	Ahorro y eficiencia energética en la carga y transporte	146
7.4.	Ahorro y eficiencia energética en instalaciones de tratamiento	146
7.5.	Mejoras energéticas de carácter general	147
<b>Capítulo 8.</b>	<b>Las auditorías energéticas como instrumento de mejora</b>	149
<b>Bibliografía y directorio web de interés</b>		157
<b>Apéndice</b>		161

Para poder aplicar medidas de ahorro y eficiencia energética, objetivo especialmente significativo en la Comunidad de Madrid al ser básicamente consumidora y con un escaso potencial energético, es necesario conocer y analizar la situación de los tipos de energía demandada por las diferentes actividades de la economía madrileña para, a continuación, poder desarrollar acciones específicas sectoriales de ahorro con una mejor acogida y mayor efectividad.

Aunque el transporte es el sector que más energía final consume en la Comunidad de Madrid, superior al 50% del total seguido del consumo doméstico con un 23,2%, la industria, donde quedan incluidas las actividades extractivas, también tiene un peso relativo significativo, ya que en conjunto absorbe el 11,6% de la energía total gastada en la Comunidad, cifra que a nivel nacional asciende hasta el 31%.

La aportación de la minería a la industria madrileña es del 2,2% del PIB de la región. Si bien esta actividad no ocupa un lugar sobresaliente en España, con tan sólo un 5,75% sobre el valor total de la producción minera según el Panorama Minero de 2007, debido fundamentalmente a que no cuenta con explotaciones metálicas ni energéticas, sí alcanza una posición relevante en relación a los productos de cantera y, especialmente, a los minerales industriales, destacando las explotaciones de gлаuberita, sepiolita, yeso y granito ornamental.

Dentro de la minería de la Comunidad de Madrid, la industria de los áridos es la más relevante del sector, en cuanto al número total de explotaciones (60%), tonelaje producido (90%) y facturación (54%).

La importancia y el peso de este subsector en el balance económico y energético de la región, viene ratificada por los informes de potencia instalada y consumo de energía final que arrojan las estadísticas mineras. Según datos de la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, de las 114 explotaciones mineras que hay actualmente activas, 64 son canteras de

caliza, granito y gravas y arenas para la obtención de áridos, con una producción vendible de casi 12 Mt, cifra que alcanza un valor monetario superior a 95 M€.

Conforme a las últimas estadísticas mineras de 2007 publicadas por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en Madrid la potencia instalada en las explotaciones mineras dedicadas a la obtención de productos de cantera alcanza la cifra de 189.220 kW (63% del total instalado), entre motores de explosión - combustión, demás motores eléctricos y resto de maquinaria, con un consumo de casi 60.000 MWh de energía eléctrica adquirida y de producción propia (43% del consumo minero total), 1,6 millones de litros de gasóleo (77% del total) y más de 2.250 t de fueloil (100% del total). (Estadísticas Minera anual 2007; <http://www.mityc.es/energia/mineria/Estadistica>).

Es por ello que la Dirección General de Industria, Energía y Minas a través de la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, consciente de la necesidad de promocionar la eficiencia energética también en el sector minero, ha publicado la presente GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL AHORRO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EXPLORACIONES DE ÁRIDOS, en la que se proporcionan los sistemas técnicos actuales y las acciones de ahorro y mejora de la eficiencia de estos recursos.

Esta Guía se enmarca dentro de una de las líneas básicas de actuación del Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012, que a su vez se articula con el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética de España 2008-2012 (PAE4+).

El Plan Energético madrileño, elaborado por la Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid, constituye el instrumento sobre el que actualmente se está desarrollando la estrategia energética de la región.

Los objetivos fundamentales de dicho Plan Energético son atender a la creciente demanda de energía, activando iniciativas de generación donde sea posible y deseable, promover el uso de recursos energéticos propios y en especial renovables, y minimizar sus efectos ambientales, además de fomentar el ahorro del consumo de energía y un uso más eficiente de los productos energéticos.

Entre las acciones desarrolladas por la Comunidad de Madrid, con una mejor acogida y mayor efectividad, cobran especial relevancia las que se realizan dentro de la campaña "**Madrid Ahorra con Energía**" y los diferentes programas de ayuda para el fomento de las energías renovables, del ahorro y la eficiencia energética, así como las numerosas y variadas publicaciones y guías sobre ahorro y buenas prácticas medioambientales dirigidas, tanto a una significativa muestra de grupos profesionales como a los consumidores en general, con especial incidencia en la población infantil y juvenil por la importancia que tiene la educación ambiental en el cambio de hábitos de consumo energético, entre otros.

La campaña "Madrid Ahorra con Energía" estructurada a su vez en siete subcampañas: Madrid Etiqueta, Educa, Gestiona, Fabrica, Acoge, Ilumina y Vive Ahorrando Energía, tiene como principios básicos concienciar a la población en el ahorro energético, así como aumentar la competitividad de los sectores productivos de la región.

Además, la Consejería de Economía y Hacienda, en colaboración con un gran número de asociaciones empresariales y organismos oficiales, ha editado hasta el momento más de 80 publicaciones y guías de ahorro y eficiencia energética, las cuales pueden ser consultadas en <http://www.fenercom.com>.

Con estas publicaciones, entre las que se incluye la presente GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL AHORRO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS, la Administración pretende poner en conocimiento de técnicos, empresarios y público en general, las técnicas y sistemas de ahorro disponibles y las líneas de investigación actualmente existentes para llevar a cabo una gestión energética más efectiva en los diferentes ámbitos económicos.



Dentro del marco nacional del Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012, la Comunidad de Madrid ha elaborado un Plan Energético 2004-2012 con los siguientes objetivos:

- ✿ Activar iniciativas de generación de energía donde sea posible y deseable.
- ✿ Fomentar el ahorro energético y mejorar la eficacia del sector en diversos niveles.
- ✿ Promover el uso de los recursos energéticos propios o de origen renovable.
- ✿ Velar por los efectos medioambientales para que, si se producen, sean lo menos dañinos posibles.

La eficiencia energética es una herramienta fundamental para dar respuesta a los cuatro grandes retos del sector energético a nivel global: cambio climático, calidad y seguridad en el suministro, evolución de los mercados y disponibilidad de fuentes de energía (Guía de Ahorro Energético de las Instalaciones Industriales: Capítulo 1, pág.: 19. Comunidad de Madrid; 2006).

Por ello, el ahorro en el consumo y la eficiencia energética de las industrias debe tener como principal objetivo mejorar la competitividad de las empresas del sector y minimizar el impacto ambiental, incrementando la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El fomento del ahorro y el uso eficiente de la energía se encuadra dentro de algunos de los principales objetivos que está previsto se alcancen al final del año 2012, cuando concluya el Plan Energético actual, destacando por su estrecha relación e influencia en los resultados previsibles, los dos siguientes:

- Reducción de un 10% del consumo energético en el 2012, respecto del escenario tendencial, por medidas de ahorro y eficiencia.
- Reducir en el año 2012 la emisión de CO<sub>2</sub> en un 10%, respecto del escenario tendencial.

Las medidas que fomenta el Plan de Acción Energética vigente hasta el año 2012, son acuerdos voluntarios, auditorías energéticas, ayudas públicas y control de los impactos producidos a través de los procedimientos medioambientales establecidos.

Si bien estas medidas no implican directamente la generación de ahorros de energía, permiten conocer cómo, dónde y cuánta energía consumen las industrias en sus procesos, así como las inversiones necesarias y las posibilidades de financiación y demás incentivos de la Administración.

Tomando como base estos principios, la GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA EL AHORRO Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS que se presenta tiene por objeto informar a las empresas extractivas y a otros profesionales relacionados con el sector, de las medidas actualmente disponibles para una correcta y sostenible gestión energética en todo el proceso extractivo y productivo.

El documento se ha estructurado en seis bloques. Un primer bloque en el que a modo introductorio se apuntan de manera genérica algunos de los conceptos básicos de la energía como son su definición, tipos de energía y unidades de medida que se manejan en los balances y datos estadísticos y, fundamentalmente, qué es el ahorro y la eficiencia energética.

En el segundo bloque se hace una breve exposición del panorama energético a nivel nacional y específico de la Comunidad de Madrid, y su tendencia actual, ahondando en el sector industrial, por ser el sector económico donde se enmarca la minería.

En el tercer bloque se ofrece una visión de la energía en las explotaciones mineras de la Comunidad de Madrid, diferenciando las fuentes y formas de ener-

gía empleadas en las fases de extracción y elaboración de los productos que mayoritariamente se comercializan en la región para determinar el grado de eficiencia y las posibilidades de ahorro.

El cuarto bloque se centra en la evaluación de los aspectos energéticos de las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid. En el estudio de los áridos se han diferenciando las fuentes y formas de energía empleadas en las fases de extracción y elaboración de los productos que mayoritariamente se comercializan en la región, para determinar el grado de eficiencia y las posibilidades de ahorro, conforme al Índice de Eficiencia Energética definido (IE).

El quinto bloque está dedicado a las medidas de eficiencia energética disponibles, respecto al consumo de explosivos, combustibles, energía eléctrica en motores e iluminación, y servicios generales (climatización y agua).

Finalmente, la Guía se completa con el sexto bloque, dedicado a las auditóreas energéticas como herramienta de mejora en el ahorro y la eficiencia energética de explotaciones mineras.



# Conceptos generales de energía, ahorro y eficiencia energética

## 3.1. Energía. Tipos y medida

En física, «energía» se define como la capacidad para realizar un trabajo. En tecnología y economía, **energía** se refiere a un recurso natural (incluyendo su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y luego darle un uso industrial o económico.

Las fuentes naturales de energía se pueden dividir en renovables y no renovables, dependiendo de su disponibilidad.

Las **fuentes de energía renovables** son aquellas que se producen o llegan en forma continua a la Tierra y que, a escalas de tiempo real, parecen ser inagotables. Estas fuentes son la energía hidráulica, la solar, la geotérmica, la mareomotriz y la energía de la biomasa.

Son **fuentes de energía no renovables** aquellas que se encuentran en forma limitada en nuestro planeta y se agotan a medida que se consumen. Este tipo de fuentes incluyen el carbón, el petróleo, el gas natural y la energía nuclear.

La mayor parte de las veces, la energía debe ser transportada, refinada y/o procesada a lo largo de la ruta de la energía, desde su obtención en bruto en la naturaleza hasta su consumo. Por ello, se distingue entre energía primaria y final.

**Energía primaria** es la cantidad total de recursos energéticos contenidos en los combustibles crudos y otras formas de energía consumidos, ya sea directamente o para su transformación en otras formas de energía. El concepto se utiliza especialmente en estadística energética en el transcurso de la compilación de balances energéticos.

La **energía final** es energía refinada y apta para ser utilizada en todas las aplicaciones que demanda la sociedad, ya sea con fines energéticos o como materia prima en los procesos productivos (consumo no energético). Se trata de un producto valioso, que debe ser usado con la máxima eficiencia.

La energía final disponible puede manifestarse de diferentes maneras, en forma de movimiento (cinética), de posición (potencial), de calor, de electricidad, de radiaciones electromagnéticas, etc. Según sea el proceso, la energía se denomina: Mecánica, Térmica, Eléctrica, Radiante, Química y Nuclear.

La **Energía Mecánica** es la que se debe a la posición (**Energía Potencial**) y al movimiento (**Energía Cinética**) de un cuerpo.

**Energía Térmica** es la forma de energía que interviene en los fenómenos caloríficos. Se puede obtener por combustión, a partir de reacciones nucleares (fisión y fusión), mediante energía eléctrica o por rozamiento. En la naturaleza se puede aprovechar directamente la energía obtenida de los rayos solares, tratándose entonces de **Energía Solar Fotovoltaica**, o del interior de la Tierra, en cuyo caso es la denominada **Energía Geotérmica**.

La **Energía Eléctrica** produce tres efectos básicos: luminoso, térmico y magnético. Se genera en las centrales eléctricas a partir de una fuente primaria de energía:

- Agua: central hidroeléctrica.
- Combustible fósil (carbón, gas natural, petróleo): central termoeléctrica.
- Urano: central nuclear.
- Sol: central solar.
- Viento: central eólica.
- Calor interior de la Tierra: central geotérmica.
- Mareas: central mareomotriz.

Y a su vez, la energía eléctrica producida se puede transformar en muchas otras formas de energía: luz, mecánica o térmica.



**Foto 3.1.** Sistemas de obtención de energía a partir de fuentes renovables, como el Sol, el viento o el calor interior de la Tierra.

La **Energía Radiante** está asociada a las ondas electromagnéticas: luz visible, ondas de radio, rayos ultravioleta e infrarrojos y radiación del Sol.

**Energía Química** es la producida por reacciones químicas que desprenden calor o que por su violencia pueden desarrollar algún trabajo o movimiento (combustión, voladuras).

La **Energía Nuclear** es aquella que se libera como resultado de una reacción nuclear. Se puede obtener por el proceso de Fisión Nuclear (división de núcleos atómicos pesados) o bien por Fusión Nuclear (unión de núcleos atómicos muy livianos).

Aunque las unidades básicas de energía son el Julio (J), la Caloría (cal) y el kilovatio hora (kWh), internacionalmente el consumo de energía se miden en **tep: tonelada equivalente de petróleo**, que es la cantidad de energía liberada en la combustión de 1 tonelada de petróleo.

La **BTU**, abreviatura de *British Thermal Unit*, es la unidad de energía inglesa. En la actualidad se usa casi exclusivamente en los Estados Unidos, ya que ha sido sustituida por el julio, que es la unidad correspondiente del Sistema Internacional.

<b>1 tep = 107 kcal</b>
<b>1 cal = 4,186 J</b>
<b>107 kcal = 11,628 MWh</b>
<b>1 BTU = 1.055 J</b>
<b>1 BTU = 252,2 cal</b>

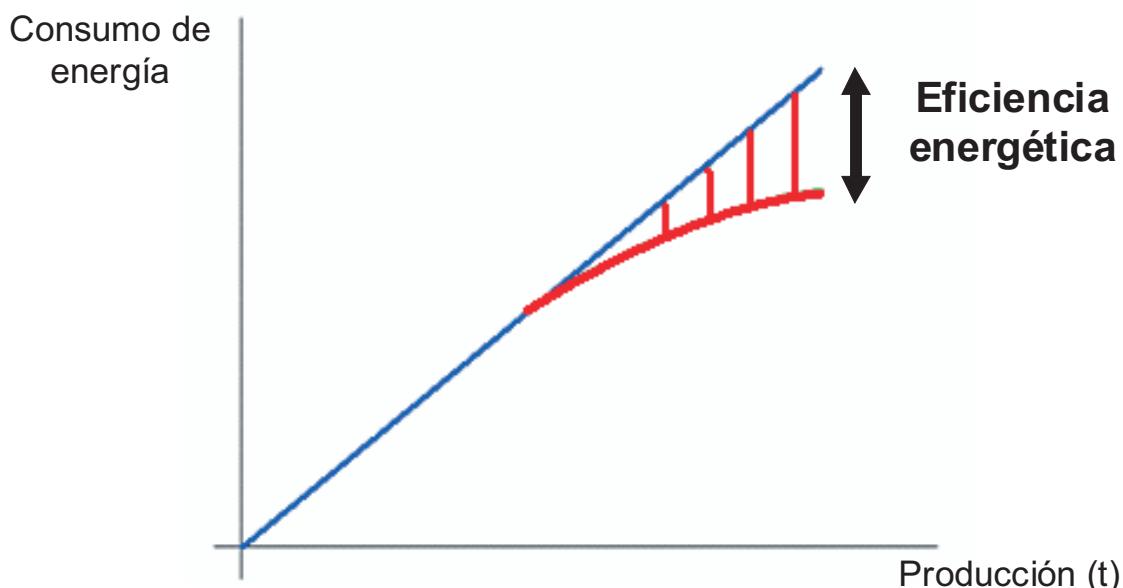
**Figura 3.1.** Equivalencias entre unidades de energía y sistemas de medidas.

## 3.2. Ahorro y eficiencia energética

La Real Academia define el término *ahorrar* como economizar, no malgastar algo. Partiendo de esta acepción lingüística, el ahorro en términos energéticos

se entiende como el conjunto de acciones que permiten reducir el gasto (ahorrar) de energía en todas sus formas (eléctrica, térmica, de combustibles, etc.), con el menor impacto sobre el medio ambiente.

La eficiencia energética es la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos, o bien, el incremento o la mejora de los productos y servicios generados manteniendo un nivel dado de energía. Dentro de un proceso productivo y en todos los ámbitos de la sociedad, en general, la eficiencia energética se puede mejorar mediante la implantación de diversas medidas e inversiones a nivel tecnológico, de gestión y de hábitos de consumo.



**Figura 3.2.** Esquema conceptual de Eficiencia Energética (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

La combinación de ambos conceptos (ahorro – eficiencia) implica reducir el uso de los recursos energéticos disponibles, a la vez que permite incorporar toda una serie de mejoras y nuevas pautas de consumo con un efecto positivo a largo plazo.

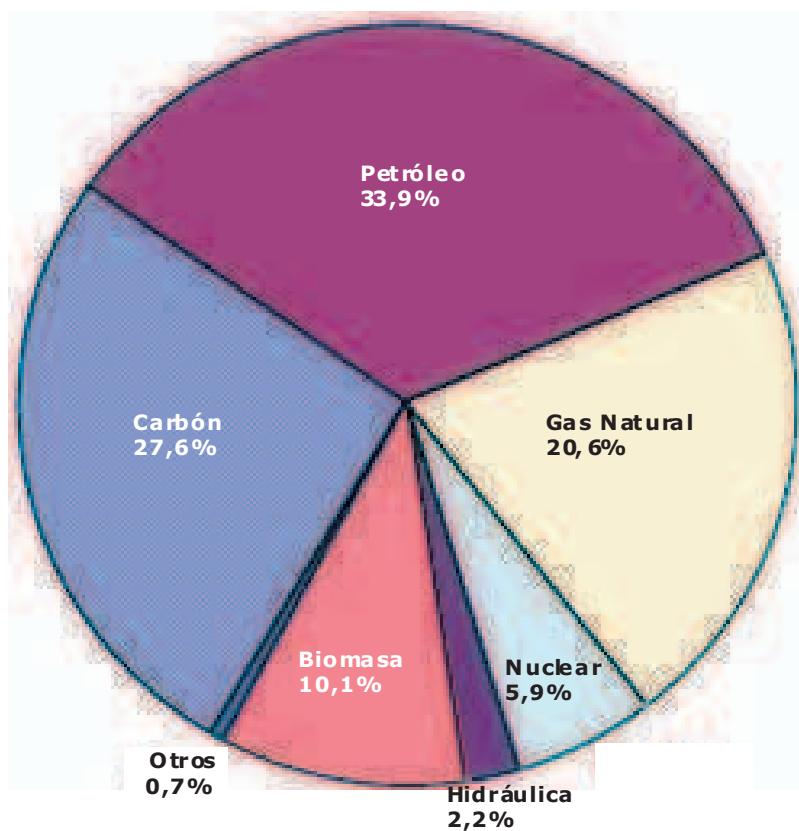
La adecuada gestión energética, a través del desarrollo de un *plan de*

ahorro y eficiencia energética puede proporcionar importantes ventajas tanto a las empresas que lo implantan como a la sociedad en general:

- ✿ Se reduce el consumo de energía primaria fósil no renovable.
- ✿ Disminuyen los consumos de energía final (calentamiento de agua, mantenimiento y almacenamiento de energía) y se optimiza su empleo.
- ✿ Permite la reducción de los costes energéticos de las empresas.
- ✿ Menores riesgos ambientales (fugas, accidentes, etc.), al tener una idea más completa de las fuentes de energía y las áreas de consumo de la actividad extractiva.
- ✿ Se cumple con la legislación ambiental vigente.
- ✿ Facilita la implantación de sistemas de gestión energética y ambiental.
- ✿ Favorece un uso sostenible de los recursos energéticos.
- ✿ Aumenta la competitividad, al favorecer que la actividad se pueda desarrollar de manera más efectiva y rentable (ahorro en el consumo de energía y reducción de los costes de producción).
- ✿ Mejora la imagen pública de la empresa.
- ✿ Posibilita la reducción del consumo energético del país.
- ✿ Contribuye a disminuir el calentamiento global, gracias a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.
- ✿ Facilita al país el cumplimiento de los diferentes compromisos en materia energética y ambiental, en especial el Protocolo de Kyoto.

### 4.1. Tendencia actual en el consumo energético nacional

Desde el punto de vista tecnológico y económico, la energía que actualmente se emplea en la producción de los bienes y servicios de la sociedad proviene de recursos naturales, en muchas ocasiones escasos. Por este motivo, es cada vez más importante llevar a cabo un aprovechamiento sostenible de las principales fuentes de energía y, en especial, de las denominadas no renovables, que incluyen los combustibles fósiles y nucleares, –carbón, petróleo, gas natural y minerales radioactivos–, ya que sus reservas son limitadas.



**Figura 4.1.** Consumo mundial de energía en 2007

(Fuente: La Energía en España, 2008. MITyC).

Es por ello que, dentro de la estructura energética de muchos países, el uso de las denominadas energías renovables o alternativas, –eólica, solar, hidráulica, mareomotriz, biomasa y geotérmica–, está avanzando muy rápidamente, no sólo por su posibilidad de renovación sino también por su menor efecto contaminante. Pero, en cualquier caso, las energías no renovables y, en concreto, el petróleo, el gas natural y el carbón, siguen siendo todavía las fuentes primarias que mayor consumo alcanzan.

Históricamente, España ha sido y es un país claramente dependiente, estando obligado a realizar masivas importaciones de energías fósiles para satisfacer las necesidades internas; así, en 2006 se importaron más de 1.010 Mtep (*La Energía en España; 2008*). En el ejercicio 2009, el balance energético también fue deficitario ya que únicamente se produjo el 23% del consumo total (29.972 ktep).

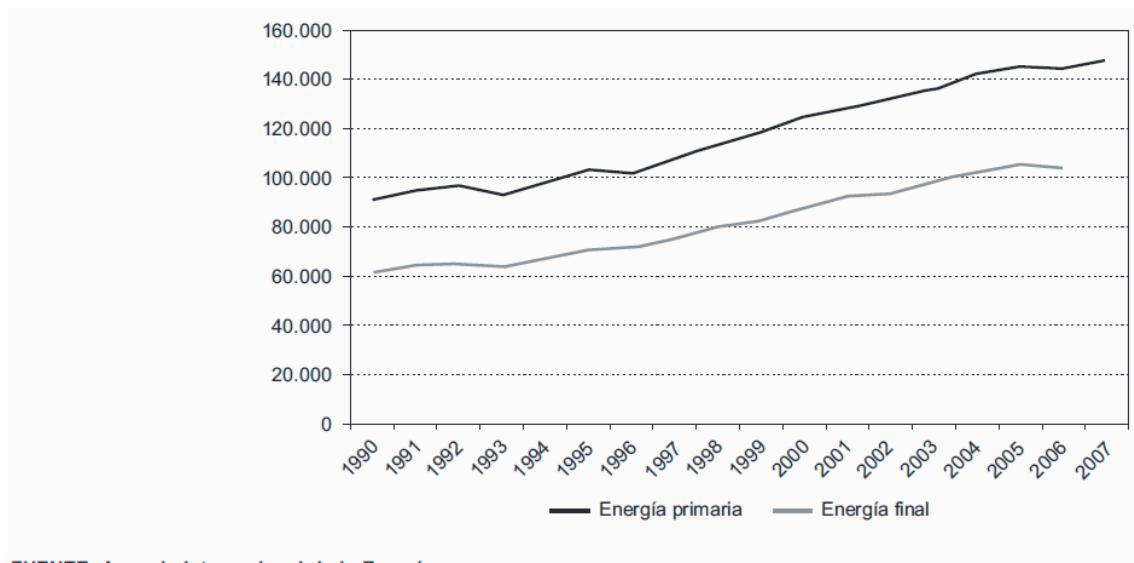
Según datos de la Agencia Europea de Estadística (*Eurostat, Statistics in Focus, 2010*), España ocupa el sexto lugar en dependencia energética de la UE-27, si bien el grado de autoabastecimiento está mejorando con respecto a los otros países europeos debido especialmente a la aportación de las energías renovables y, en concreto, a la evolución de la generación eléctrica con este tipo de fuentes renovables, la cual se estima en más de un 7,3% anual para la próxima década (*Secretaría de Estado de la Energía del MITyC; abril, 2010*).

En España el consumo de energía, tanto primaria como final, ha seguido una evolución similar a la de la mayoría de los países europeos y, en especial, respecto a los productos derivados del petróleo, en cuanto a que es este compuesto y sus derivados y, particularmente el gasóleo, el recurso más demandado, con un consumo muy superior al crecimiento económico.

Como se observa en la Fig. 4.3, esta tendencia creciente en la Comunidad de Madrid se rompió en 2001, cuando se inicia una mejoría en el ratio de intensidad energética<sup>1</sup>, manteniéndose desde entonces un descenso sostenido de un 8,2% en total, algo por debajo de la reducción de la UE-27, que se cifra en un 10%. Según las previsiones del Gobierno, se espera que nuestro país alcance la convergencia en intensidad energética con la Unión Europea en el año 2020, tras

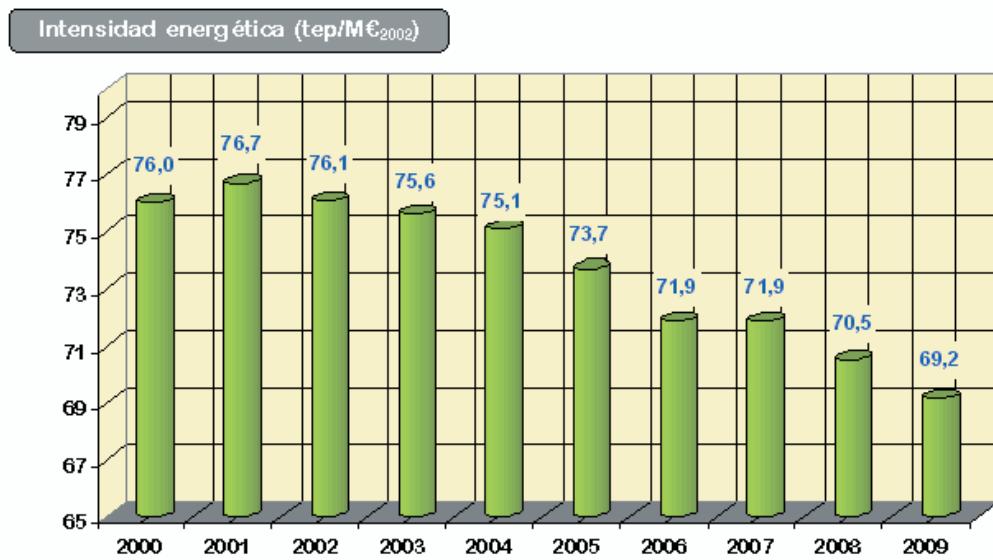
<sup>1</sup> INTENSIDAD ENERGÉTICA = CONSUMO DE ENERGÍA (PRIMARIA O FINAL) / PIB

acumular ganancias anuales del 2% durante este periodo ([www.mityc.es/es-ES/GabinetePrensa/Discursos](http://www.mityc.es/es-ES/GabinetePrensa/Discursos)).



FUENTE: Agencia Internacional de la Energía.

**Figura 4.2.** Evolución del consumo energético en España. 1990 – 2007 (Fuente: LINARES, P.; 2009. Eficiencia energética y medio ambiente. ECONOMÍA Y MEDIO AMBIENTE ICE, N° 847).



**Figura 4.3.** Evolución de la intensidad energética en España desde el año 2000 (Fuente: Comunidad de Madrid).

Si bien esta situación de bonanza en cuanto al consumo está coincidiendo con una importante crisis económica a nivel mundial, es probable que también sea reflejo de una mejoría en la eficiencia energética, como consecuencia de la incidencia positiva de las políticas gubernamentales implantadas para fomentar el estímulo del ahorro y la eficiencia energética, concretamente de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012. Sin embargo, como señalan algunos analistas expertos en estos temas, la moderación en la evolución de la intensidad energética también puede ser reflejo de otros aspectos, como el aumento de los precios energéticos, la climatología, los cambios económicos estructurales, la mejora de la productividad energética, etc.

De hecho, tal y como se muestra en la Tabla 4.1, aunque en 2006, 2008 y, especialmente, en 2009, el consumo de energía primaria descendió bastante drásticamente, situándose en 130.557 ktep, un 8,14% menos que en 2008, España sigue siendo uno de los países europeos con mayor demanda. En 2008 ocupaba el quinto puesto de la UE-27, únicamente superada por Alemania, Francia, Reino Unido e Italia, cuyas intensidades energéticas han ido disminuyendo progresivamente en las dos últimas décadas.

**Tabla 4.1.** Evolución en el consumo de energía primaria en España.

Evolución del consumo de energía primaria en España (ktep)																				
	2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009	
	ktep	%																		
<b>Carbón</b>	21.635	17,3	19.528	15,3	21.891	16,6	20.461	15,0	20.921	14,7	21.183	14,5	18.477	12,8	20.354	13,9	13.983	9,8	10.353	7,9
<b>Productor petrolíferos</b>	64.663	51,7	66.721	52,2	67.607	51,1	69.313	50,8	71.054	50,0	71.786	49,2	70.759	49,1	70.848	48,3	68.182	47,9	63.673	48,8
<b>Gas natural</b>	15.223	12,2	16.405	12,8	18.757	14,2	21.254	15,6	24.671	17,4	29.120	20,0	30.298	21,0	31.602	21,6	34.782	24,4	31.104	23,8
<b>Nuclear</b>	16.211	13,0	16.602	13,0	16.422	12,4	16.125	11,8	16.576	11,7	14.995	10,3	15.669	10,9	14.360	9,8	15.368	10,8	13.750	10,5
<b>Energías renovables</b>	6.990	5,6	8.377	6,5	7.128	5,4	9.221	6,8	9.148	6,4	8.876	6,1	9.211	6,4	9.967	6,8	10.943	7,7	12.325	9,4
<b>Saldo Energético</b>	382	0,3	297	0,2	458	0,3	109	0,1	-260	-0,2	-116	-0,1	-282	-0,2	-495	-0,3	-949	-0,7	-697	-0,5
<b>TOTAL</b>	<b>125.104</b>	<b>100</b>	<b>127.930</b>	<b>100</b>	<b>132.263</b>	<b>100</b>	<b>136.483</b>	<b>100</b>	<b>142.110</b>	<b>100</b>	<b>145.844</b>	<b>100</b>	<b>144.132</b>	<b>100</b>	<b>146.636</b>	<b>100</b>	<b>142.309</b>	<b>100</b>	<b>130.508</b>	<b>100</b>

(FUENTE: Balance Energético de la Comunidad de Madrid; 2009. Fundación de la Energía - Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid y Secretaría de Estado de Energía del MITyC).

El tipo de fuentes energéticas que conforman la estructura primaria del consumo también es muy similar al resto de los países industrializados. Así, en 2009,

los productos petrolíferos siguen siendo los recursos más demandados, con casi un 49% del total, seguidos por el gas natural que, además de experimentar el mayor aumento pasando de un 12,2% en 2000 a casi un 24% en 2009, se perfilan con una gran proyección a futuro.

Tan solo las renovables han visto crecer su demanda habiendo aumentado su consumo más de un 174% en una década. Por el contrario, muestran una tendencia claramente descendente la energía nuclear y, en especial, el carbón, aunque en el resto del mundo sigue siendo la energía primaria de mayor consumo en los últimos años.

La energía final, una vez transformada, es más representativa de la actividad económica de un país que la primaria, debido, en parte, a que sufre menos oscilaciones por unidad de PIB, erigiéndose como un importante indicador del consumo y del ahorro energético interno. Por ello, es interesante analizar un poco más detenidamente la evolución y estructura del consumo energético final, con vistas a poder determinar si, en principio, resultará factible alcanzar el objetivo de gasto de 126.011 ktep, planteado por La Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética (E4), para el año 2012.

En la Tabla 4.2 se observa que la evolución del consumo de energía final, incluyendo el consumo para usos no energéticos que representa menos del 9,5%, mantiene una distribución y tendencia similares a las del consumo de fuentes primarias, Fig. 4.2.

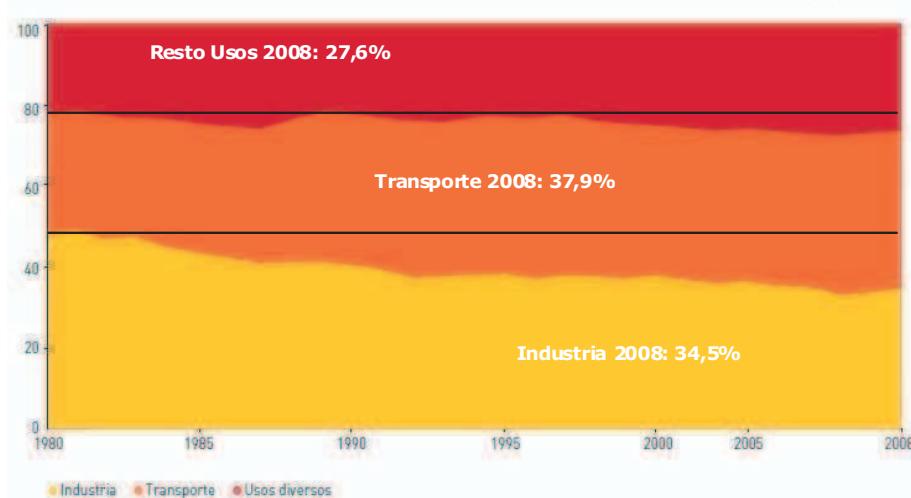
A este respecto debe apuntarse que la tendencia de años anteriores, con fuertes crecimientos, también se ha visto rota en la demanda de 2008 y 2009, aunque la bajada más drástica la han sufrido el sector terciario y los servicios, con casi un 5%, habiendo descendido, también, el sector transporte un 2,9%. Únicamente el consumo energético industrial experimentó un ligero aumento en el año 2008, cifrado en un 0,3%, pero sin volver a los niveles anteriores al año 2005.

La mayor parte de esta energía se emplea como combustible (> 90,5%), siendo los productos petrolíferos los recursos más solicitados, seguidos por la electricidad y el gas natural, que en 2009 ya alcanzaba el 15,8% del total, constituyéndose como el tipo de energía final con mayor tasa de crecimiento, especialmente a

**Tabla 4.2.** Evolución del consumo final energético en España por fuentes y sectores (ktep).

	1980	1990	2000	2005	2006	2007	2008	2009
<b>INDUSTRIA</b>	<b>24.306</b>	<b>24.423</b>	<b>32.826</b>	<b>35.969</b>	<b>33.889</b>	<b>36.208</b>	<b>36.333</b>	
CARBÓN	3.191	3.893	2.466	2.395	2.240	2.467		
P. PETROLÍFEROS	15.731	11.306	13.350	11.293	10.027	9.871		
GAS NATURAL	720	3.677	9.602	13.261	12.406	13.384		
ELECTRICIDAD	4.664	5.547	7.408	9.021	9.215	9.537		
E. RENOVABLES					948			
<b>TRANSPORTE</b>	<b>14.570</b>	<b>22.716</b>	<b>32.276</b>	<b>38.691</b>	<b>39.803</b>	<b>41.103</b>	<b>39.927</b>	
CARBÓN	11	0	0	0	0	0		
P. PETROLIFEROS	14.414	22.478	31.176	38.232	39.343	40.229		
GAS NATURAL	0	0	0	0	0	0		
ELECTRICIDAD	146	238	362	459	461	473		
E. RENOVABLES					401			
<b>USOS DIVERSOS</b>	<b>11.332</b>	<b>13.531</b>	<b>21.671</b>	<b>27.964</b>	<b>27.463</b>	<b>30.529</b>	<b>29.087</b>	
CARBÓN	302	378	80	29	25	31		
P. PETROLIFEROS	7.592	7.109	10.365	12.213	11.549	11.726		
GAS NATURAL	500	854	2.690	4.367	4.024	4.395		
ELECTRICIDAD	2.938	5.190	8.536	11.355	11.864	12.112		
E. RENOVABLES					2.264			
<b>TOTAL</b>	<b>50.208</b>	<b>60.670</b>	<b>90.318</b>	<b>106.440</b>	<b>101.155</b>	<b>107.840</b>	<b>105.679</b>	<b>98.107</b>
CARBÓN	3.504	4.271	2.546	2.424	2.265	2.498	2.344	1.608
P. PETROLIFEROS	37.737	40.893	54.891	61.738	60.919	61.826	59.663	55.305
GAS NATURAL	1.220	4.531	12.292	17.628	16.430	17.779	17.281	15.462
ELECTRICIDAD	7.748	10.975	16.306	20.835	21.540	22.122	22.088	20.989
E. RENOVABLES	-	-	3.545	3.815	3.612	3.972	4.303	4.746
<b>ESTRUCTURA (%)</b>								
<b>INDUSTRIA</b>	<b>48,41</b>	<b>40,26</b>	<b>37,83</b>	<b>35,05</b>	<b>33,5</b>	<b>33,6</b>	<b>34,5</b>	
<b>TRANSPORTE</b>	<b>29,02</b>	<b>37,44</b>	<b>37,2</b>	<b>37,7</b>	<b>39,35</b>	<b>38,1</b>	<b>37,9</b>	
<b>USOS DIVERSOS</b>	<b>22,57</b>	<b>22,3</b>	<b>24,97</b>	<b>27,25</b>	<b>27,15</b>	<b>28,3</b>	<b>27,6</b>	

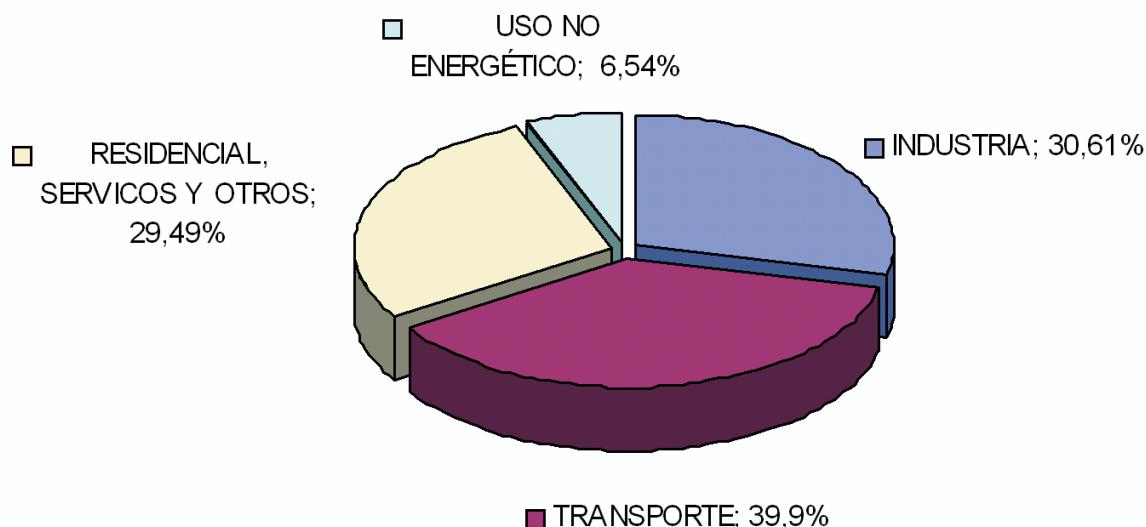
(FUENTE: Balance Energético de la Comunidad de Madrid; 2008. Fundación de la Energía - Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid; y La Energía en España, 2007. Secretaría de Estado de Energía del MITyC).



**Figura 4.4.** Evolución del consumo de energía final por sectores económicos en España - 2009. (Fuente: Informe de Sostenibilidad en España).

partir de los años 90, debido a su uso en las centrales de ciclo combinado para obtener electricidad en las industrias. Por el contrario, el carbón está en claro declive, fundamentalmente por la menor actividad global del sector industrial, y en concreto, de la siderurgia que consumía cerca del 70% del total, hasta el año 2006.

El aumento del transporte por carretera, producido a partir de los años noventa, ha acentuado drásticamente el consumo de carburantes, que en tres décadas se ha visto casi triplicado. Esta circunstancia ha hecho que pase a ser el sector que más energía consume a nivel nacional, superando el año 2008 en 9,3 puntos al industrial, que tradicionalmente había sido el mayor consumidor.



**Figura 4.5.** Consumo de energía final por sectores económicos en España, 2008.

Hasta el año 2006, la demanda de energía ha ido aumentando por encima de la media de los países europeos y del PIB, con el consiguiente agravamiento de la dependencia energética nacional. Pero a partir del 2008, tan sólo las energías renovables mantienen su aumento en la demanda, consiguiendo crecer en 2009 más de un 10% respecto al año anterior, debido, en buena parte, al impulso que desde el propio gobierno se está dando a su empleo, cristalizado en el Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000-2010 y en su revisión de 2005-2010.

Bien como fruto de las medidas tomadas hasta el momento para contener la evolución creciente del consumo de energía final, bien como consecuencia de factores coyunturales achacables a la situación económica del país y mundial, lo cierto es que, después del repunte del año 2007, se ha iniciado un descenso que en el 2009 ha supuesto una bajada del 6,9% respecto del 2008, alcanzándose niveles similares a los del 2003, año en el que se consumieron 100.826 ktep.

Otro dato positivo derivado de esta situación es que con el mix de energías empleadas desde el 2005, las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada GWh de energía eléctrica producida se han reducido un 31% (Secretaría de Estado de la Energía).

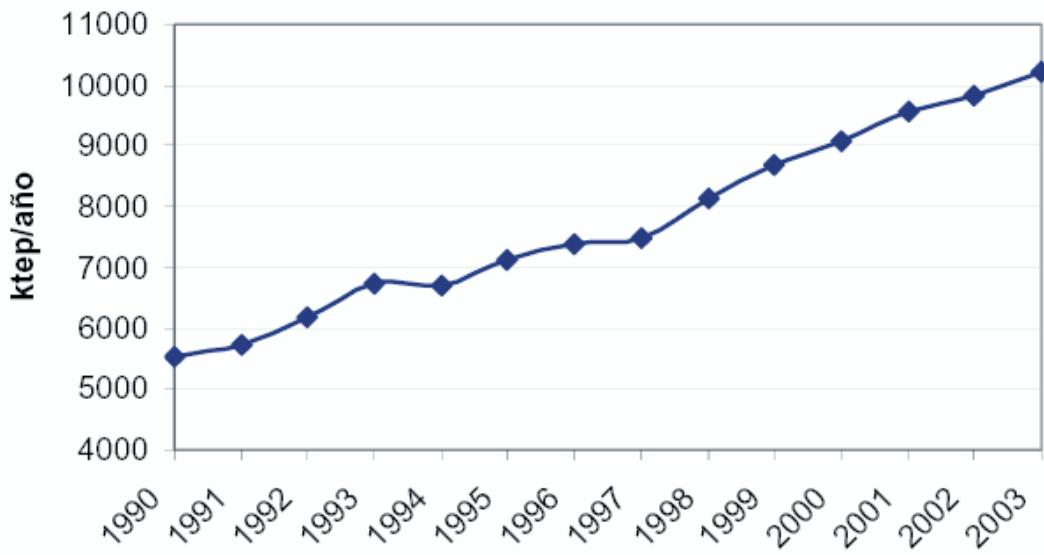
Y, como resultado de los esperanzadores datos de los dos últimos años, y si se consigue mantener un ritmo a la baja en el consumo de energía final similar al actual, es posible que para el 2012 se logre alcanzar un nivel de consumo inferior a los 126.011 ktep que fija la Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética (E4) como límite para ese año.

## 4.2. Situación energética de la Comunidad de Madrid

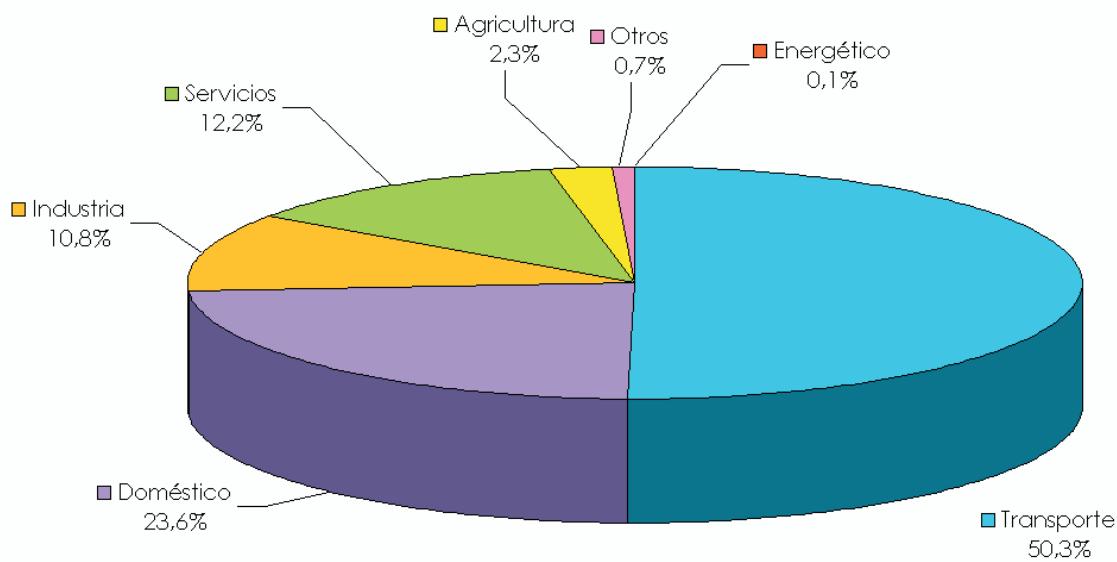
El gasto de energía final de la Comunidad de Madrid también ha ido aumentando en los últimos años, alcanzándose en el 2009 los 11.035 ktep, cifra que representa el 11,3% del consumo nacional que asciende a 97.777 ktep.

Aunque con una tendencia bastante constante y similar al resto de territorio, las particularidades socioeconómicas de la región influyen directamente en la estructuración sectorial del mercado energético, y en su balance final.

Se trata de una comunidad uniprovincial muy pequeña (1,6% del territorio nacional), pero con una elevada densidad de población (13,6% del total nacional), caracterizada por una importante actividad económica que aporta la sexta parte del PIB nacional. Debido al carácter eminentemente residencial de Madrid, la actividad está centrada básicamente en el comercio, los servicios y el transporte, cuya cuota de consumo es superior al 50% de la energía final consumida, siendo significativa la escasa presencia de industrias transformadoras primarias de alto consumo eléctrico.



**Figura 4.6.** Evolución de la energía final en la Comunidad de Madrid. (Fuente: Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012).



**Figura 4.7.** Consumo de energía final por sectores en la Comunidad de Madrid, 2009. (Fuente: Balance Energético de la Comunidad de Madrid 2009).

Esta situación hace que las energías más demandadas sean los productos petrolíferos, la electricidad y el gas natural, con más del 98% del total consumido.

**Tabla 4.3.** Evolución del consumo de energía final en la Comunidad de Madrid (ktep).

AÑOS	2000	2005	2006	2007	2008	2009
<b>S. INDUSTRIAL</b>	<b>1.181</b>	<b>1.354</b>	<b>1.371</b>	<b>1.513</b>	<b>1.332</b>	<b>1.192</b>
CARBÓN	2	2	2	2	1	1
D. PETROLÍFEROS	382	337	315	299	228	184
ENERGÍA ELÉCTRICA	394	433	455	462	449	400
ENERGÍA TÉRMICA	74	150	141	133	136	105
GAS NATURAL	330	432	458	617	518	502
BIOCOMBUSTIBLES	0	0	0	0	0	0
<b>S. TRANSPORTE</b>	<b>4.601</b>	<b>5.404</b>	<b>5.558</b>	<b>5.774</b>	<b>5.888</b>	<b>5.555</b>
CARBÓN	0	0	0	0	0	0
D. PETROLÍFEROS	4.515	5.288	5.434	5.638	5.639	5.339
ENERGÍA ELÉCTRICA	86	103	100	114	123	92
ENERGÍA TÉRMICA	0	0	0	0	0	0
GAS NATURAL	0	13	21	17	118	114
BIOCOMBUSTIBLES	0	0	3	6	8	10
<b>S. SERVICIOS</b>	<b>868</b>	<b>1.144</b>	<b>1.212</b>	<b>1.217</b>	<b>1.296</b>	<b>1.342</b>
CARBÓN	0	0	0	0	0	0
D. PETROLÍFEROS	43	37	32	33	31	29
ENERGÍA ELÉCTRICA	694	996	1.053	1.085	1.144	1.176
ENERGÍA TÉRMICA	1	1	1	1	2	3
GAS NATURAL	130	110	125	97	119	135
BIOCOMBUSTIBLES	0	0	0	0	0	0
<b>S. DOMÉSTICO</b>	<b>2.292</b>	<b>2.645</b>	<b>2.611</b>	<b>2.663</b>	<b>2.643</b>	<b>2.608</b>
CARBÓN	16,0	12,0	11,5	11,3	10,4	9,5
D. PETROLÍFEROS	865,3	539,7	474,9	491,4	468,8	435,1
ENERGÍA ELÉCTRICA	611,3	784,0	800,3	818,2	856,7	869,4
ENERGÍA TÉRMICA	59,6	54,3	54,7	57,7	56,9	58,1
GAS NATURAL	739,9	1254,9	1269,8	1284,7	1249,7	1236,0
BIOCOMBUSTIBLES	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>RESTO SECTORES</b>	<b>258</b>	<b>441</b>	<b>490</b>	<b>486</b>	<b>414</b>	<b>338</b>
CARBÓN	7	6	5	5	5	4
D. PETROLÍFEROS	156	315	344	351	306	256
ENERGÍA ELÉCTRICA	87	85	85	73	60	41
ENERGÍA TÉRMICA	0	0	0	0	0	0
GAS NATURAL	8	36	55	57	42	37
BIOCOMBUSTIBLES	0	0	0	0	0	0
<b>CONSUMO TOTAL</b>	<b>9.200</b>	<b>10.989</b>	<b>11.242</b>	<b>11.654</b>	<b>11.573</b>	<b>11.035</b>
CARBÓN	26	20	19	18	17	15
D. PETROLÍFEROS	5.962	6.516	6.600	6.813	6.673	6.243
ENERGÍA ELÉCTRICA	1.871	2.401	2.493	2.552	2.633	2.577
ENERGÍA TÉRMICA	134	205	197	192	195	166
GAS NATURAL	1.208	1.847	1.929	2.073	2.047	2.024
BIOCOMBUSTIBLES	0	0	3	6	8	10
<b>ESTRUCTURA (%)</b>						
<b>INDUSTRIA</b>	<b>12,84</b>	<b>12,33</b>	<b>12,20</b>	<b>12,98</b>	<b>11,51</b>	<b>10,80</b>
<b>TRANSPORTE</b>	<b>50,01</b>	<b>49,18</b>	<b>49,44</b>	<b>49,55</b>	<b>50,88</b>	<b>50,34</b>
<b>SERVICIOS</b>	<b>9,44</b>	<b>10,41</b>	<b>10,78</b>	<b>10,44</b>	<b>11,20</b>	<b>12,16</b>
<b>DOMÉSTICO</b>	<b>24,91</b>	<b>24,07</b>	<b>23,23</b>	<b>22,85</b>	<b>22,83</b>	<b>23,63</b>
<b>RESTO SECTORES</b>	<b>2,80</b>	<b>4,02</b>	<b>4,35</b>	<b>4,17</b>	<b>3,57</b>	<b>3,06</b>

(FUENTE: Balance Energético de la Comunidad de Madrid; 2009. Fundación de la Energía - Consejería de Economía y Hacienda de la Comunidad de Madrid).

Tal y como se observa en la Tabla 4.3, al igual que en España, el aumento en el consumo energético total también se ha visto interrumpido durante el año 2009, con una bajada del 5%, respecto al año anterior.

En los últimos años destaca el auge del gas natural que, desde el año 2000, casi ha duplicado su consumo, pasando de un 13% a cerca del 18% de la energía demandada, mientras que el carbón en la Comunidad de Madrid ha pasado a ser una energía completamente marginal.

El transporte es el sector que más energía final demanda y el que absorbe la mayor parte de los derivados del petróleo gastados en la región. A éste le sigue el consumo doméstico con una tasa por encima del 23,6%, centrado básicamente en el gas natural con un incremento especialmente significativo a lo largo de la última década.

En el caso del sector servicios, aproximadamente el 87% del consumo corresponde a electricidad y el 10% a gas, siendo prácticamente despreciable el gasto de productos petrolíferos. En el resto de sectores (doméstico e industrial, fundamentalmente) el consumo se reparte más homogéneamente entre la electricidad, el gas y los combustibles.

Como ya se ha indicado, esta distribución energética dentro del contexto macroeconómico de la Comunidad de Madrid, la aparta sustancialmente de los indicadores que conforman el panorama energético del resto del territorio español y del conjunto comunitario, destacando los siguientes aspectos (datos 2003):

- Madrid obtiene un consumo medio por habitante y año de 1,73 tep/persona, inferior al español, con 2,1 tep/persona, y al conjunto de la Unión Europea que varía entre un 2,6-2,4 tep/persona.
- Madrid produce tan sólo un 3,18% de la tasa de energía total que consume (1,56% si no se incluye la cogeneración de combustibles no renovables), frente al 21,6% que produce España, por lo que es una provincia obligada a importar la mayor parte de la energía para cubrir la demanda existente (Balance Energético del año 2009).

- La Comunidad de Madrid apenas dispone de fuentes primarias propias, a excepción de algunas instalaciones hidroeléctricas y pequeñas plantas relacionadas con energías renovables (energía solar, plantas eólicas, de recuperación de biomasa y cogeneración).
- En cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> energético, la Comunidad de Madrid presenta un valor de 6,1 t/persona, también inferior al nacional y al europeo con 7,2 t/persona y 8/8,3 t/persona respectivamente.

Estas circunstancias hacen que cobre más interés, si cabe, el vigente Plan Energético desarrollado por el Gobierno de la Comunidad de Madrid para el periodo 2004-2012, en el que se exponen las estrategias y líneas de actuación que son necesarias desarrollar para garantizar el suministro de la energía demandada bajo unas óptimas condiciones de calidad medioambiental, que aseguren la sostenibilidad energética de la región. Es por ello, que la incorporación de las energías renovables al mix energético final es también, junto al resto de actuaciones prioritarias, uno de los pilares básicos de la estrategia energética madrileña.

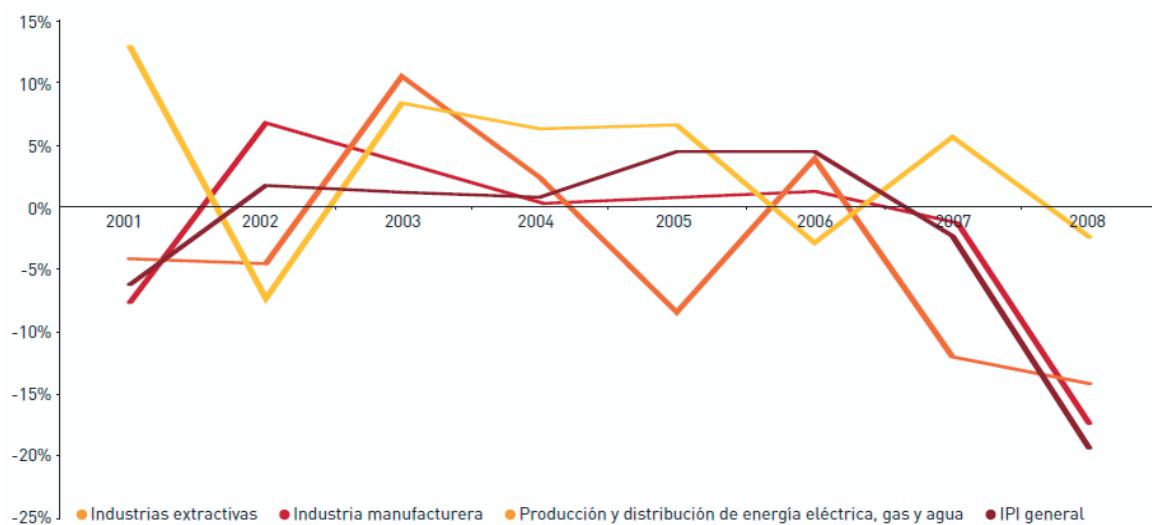
## 4.3. Consumo de energía en el sector industrial

### 4.3.1. El sector industrial en España

El análisis del sector industrial es una cuestión clave en los procesos de sostenibilidad por la importancia general que tiene en el desarrollo económico de un país, basándose en las presiones e impactos ambientales que lleva asociado. De ahí, su capacidad de aportar soluciones innovadoras y ecoeficientes (Sostenibilidad en España, 2009).

Además, dentro de los objetivos del presente estudio, también es importante conocer los cambios y tendencias en el consumo industrial de energías dado que tradicionalmente la minería y sus industrias derivadas han constituido y siguen constituyendo, aunque con cambios en su estructuración, una de las tres grandes ramas de la actividad industrial española: industrias extractivas, industrias manufactureras y de producción y distribución de energía eléctrica, gas y agua.

En el año 2008 la industria representaba el 17,3% del PIB nacional (Sostenibilidad en España 2009), con una disminución interanual del 14,1% en su actividad productiva general (IPI<sup>2</sup>). Como se aprecia en la Fig. 4.8, las industrias extractivas han tenido una evolución bastante variable a lo largo de la última década aunque con una clara tendencia a la baja pero inferior al resto de ramas de actividad y al IPI general.



**Figura 4.8.** Evolución del Índice de Producción Industrial (IPI) por ramas de actividad industrial (Fuente: OSE a partir de INE, 2009).

El control del gasto energético por parte de las industrias españolas se inició a finales de los años ochenta y principios de los noventa, como consecuencia del efecto positivo de las medidas de ahorro, que ya comenzaron a ponerse en práctica en los años setenta, y a las mejoras en la eficiencia de los procesos industriales (Guía Práctica de la Energía. Consumo Eficiente y Responsable; 2007. IDAE).

A este respecto debe señalarse que, a partir del año 2008 la industria española, al igual que el resto de los sectores económicos, ha experimentado el efecto

<sup>2</sup> El Índice de Producción Industrial (IPI) mide la evolución mensual de la actividad productiva de las ramas industriales, es decir, de las industrias extractivas, manufactureras y de producción y distribución de energía eléctrica, agua y gas. Este indicador refleja la evolución conjunta de la cantidad y de la calidad, eliminando la influencia de los precios ([http://www.ine.es/prensa/ipi\\_prensa.htm](http://www.ine.es/prensa/ipi_prensa.htm)).

to de la crisis que, a nivel global, está afectando a la mayoría de los países desarrollados; al disminuir la demanda, el número de industrias ha descendido destruyéndose puestos de trabajo.

Esta situación repercute y se refleja en una serie de indicadores que muestran la marcha del sector y la eficiencia en la industria española actual (ecoeficiencia):

- Desaceleración en el consumo de energía total. En el año 2008 el consumo permaneció prácticamente estable con respecto al del año anterior.
- Descenso acusado de las emisiones de CO<sub>2</sub>, COVNM y NO<sub>x</sub>, aunque aumentan las de SO<sub>2</sub>.
- Ligero aumento de la generación de residuos: un 2,5% en los no peligrosos y un 1,4% en los peligrosos.
- Prosigue el crecimiento del VAB industrial<sup>3</sup>.

Las emisiones y los residuos derivados de la actividad industrial, todavía constituyen un obstáculo importante en la lucha por alcanzar la ecoeficiencia en la industria. La introducción de las mejores técnicas disponibles y la implantación de Sistemas de Gestión Ambiental (SGMA), constituyen las mejores herramientas para hacer que las industrias sean más eficientes y competitivas.

La Encuesta de Consumos Energéticos (ECE) clasifica la actividad industrial en 100 sectores y 13 agrupaciones, incluyendo la actividad minera y sus productos derivados dentro de las industrias extractivas y del petróleo y de los productos minerales no metálicos diversos que, a su vez, abarcan a los cementos, cales, vidrio, ladrillos y otros materiales de construcción.

En relación a los sectores con mayor consumo porcentual de energías, la minería está representada básicamente por las actividades relacionadas con

<sup>3</sup> VAB industrial. Se calcula como diferencia entre la producción y los consumos intermedios.

productos minerales no metálicos, fabricación de cemento, cal y yeso, y de elementos de hormigón, yeso y cemento, y con la extracción de carbón y minerales no energéticos.

Según el Banco Público de Indicadores Ambientales del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, las fuentes energéticas que consumen las empresas industriales actualmente, son, por este orden, gas natural, electricidad, productos petrolíferos, carbón y energías renovables, Fig. 4.9.



**Figura 4.9.** Consumo de energía final en la industria

(Fuente: Perfil Ambiental de España 2009).

Mientras que el consumo de productos petrolíferos en el sector industrial ha ido decreciendo paulatinamente desde 1995, la electricidad y, especialmente, el gas, debido fundamentalmente a su empleo en las centrales de ciclos combinados para obtener electricidad, han incrementando su participación en el consumo junto con las energías renovables que, poco a poco, van aumentando su cuota de mercado. El carbón mantiene una tasa bastante estable.

Según la última encuesta de consumos energéticos en la industria realizada el año 2007 (Instituto Nacional de Estadística; 2009. ECE 2007), el consumo energético total alcanzó los 10.980 M€, abarcando casi la mitad del gasto la electricidad con un 48,3%, seguida por el gas con un 27,8% y los productos petrolíferos que ascienden a un 17,5%.

**Tabla 4.4.** Distribución porcentual por tipos de energía y agrupaciones de actividad, 2007.

Agrupaciones de actividad	Carbón y derivados (%)	Productos petrolíferos (%)	Gas (%)	Electricidad (%)	Otros consumos energéticos (%)	Total consumos energéticos
<b>Total industria extractiva y manufacturera</b>	<b>2,7</b>	<b>17,5</b>	<b>27,8</b>	<b>48,3</b>	<b>3,7</b>	<b>10.980.004</b>
Industrias extractivas y del petróleo	1,2	37,6	11,9	47,0	2,3	658.915
Alimentación, bebidas y tabaco	0,3	24,4	23,8	48,8	2,7	1.496.022
Industria textil, confección, cuero y calzado	0,0	13,7	27,7	55,4	3,2	300.238
Madera y corcho	0,0	26,6	11,5	57,6	4,3	202.255
Papel, edición, artes gráficas	0,1	8,5	37,9	46,5	7,0	902.072
Industria química	1,2	10,9	43,5	37,4	7,1	1.528.876
Caucho y materias plásticas	0,0	6,9	12,2	76,7	4,1	471.765
Productos minerales no metálicos diversos	9,8	19,9	36,5	31,7	2,2	2.325.319
Metalurgia y fabricación de prod. metálicos	1,5	13,1	21,5	60,5	3,4	2.032.129
Maquinaria y equipo mecánico	0,2	26,5	14,6	56,8	1,9	202.557
Material y equipo eléctrico, electrónico y óptico	0,0	17,2	9,3	72,3	1,2	201.980
Material de transporte	0,0	14,7	20,1	61,7	3,5	487.778
Industrias manufactureras diversas	3,8	31,2	6,0	57,9	1,2	170.097

Fuente: Notas de Prensa en: [www.ine.es/prensa/prensa.htm](http://www.ine.es/prensa/prensa.htm).

Las agrupaciones de actividad industrial de mayor consumo energético en el año 2007 correspondieron a los productos minerales no metálicos diversos, con más del 21% del total, seguidos por las industrias de metalurgia y fabricación de productos metálicos con el 18,5%, la industria química con el 13,9% y la de alimentación, bebidas y tabaco con el 13,6%. Las industrias extractivas y del petróleo que consumen un 6% del total, ocupan el sexto lugar del ranking, por detrás del papel, edición y artes gráficas.

Respecto a la utilización de los diferentes tipos de combustible por los principales sectores industriales relacionados con la minería y sus derivados, destacan los siguientes resultados de la ECE de 2007:

- ✿ Los consumos energéticos suponen un 2,3% sobre el total de gastos de explotación para el conjunto de empresas con 20 o más personas ocupadas. Destacan la agrupación de productos minerales no metálicos, en la que llega a suponer un 7,5% y la de papel, edición, artes gráficas y reproducción de soportes grabados con un 3,7%.
- ✿ Dentro de que el carbón es un tipo de combustible actualmente bastante marginal, las actividades que mayoritariamente lo consumen son la elabora-

ción de cemento, yeso y cal donde representó el 34,4% del total, y la extracción y aglomeración de los distintos tipos de carbón mineral (antracita, hulla, lignito y turba) con un gasto del 8,3%.

- Los sectores que más productos petrolíferos emplean, destacando el gasoil con una demanda del 56%, también están relacionados con la minería y, en concreto, con la fabricación de elementos de hormigón, yeso y cemento (67,9%), y con la extracción de minerales energéticos.
- La utilización de gas natural y manufacturado fue significativa en el sector de los productos minerales no metálicos diversos (46,8%).
- El consumo de electricidad y de otro tipo de recurso energéticos no fue representativo en el sector minero.

Por autonomías, Cataluña, Valencia, Andalucía y País Vasco son las comunidades que tienen un consumo mayor de energía, ocupando Madrid el puesto número siete, con un gasto del 6,34% del total consumido en España, Tabla 4.5. Por el contrario, las Islas Baleares y La Rioja son las que menos energía consumen. Cada vez son más las comunidades en las que el gasto principal es la electricidad, siendo actualmente en ocho (Asturias, Cataluña, Galicia, Madrid, Murcia, Navarra, País Vasco y La Rioja), en donde más del 50% del mismo corresponde a este tipo de energía.

#### **4.3.2. El consumo energético de las industrias de la Comunidad de Madrid**

El sector industrial madrileño absorbe el 11,26% de la energía que se consume en la Comunidad, concretamente 1,3 Mtep, Tabla 4.3, siendo el grado de autoabastecimiento relativo al disponer de tan sólo un 12,7% (165,3 ktep) de fuentes de energía primaria, teniendo, por tanto, una elevada dependencia exterior, aunque comparativamente inferior al resto nacional, como ya se ha indicado.

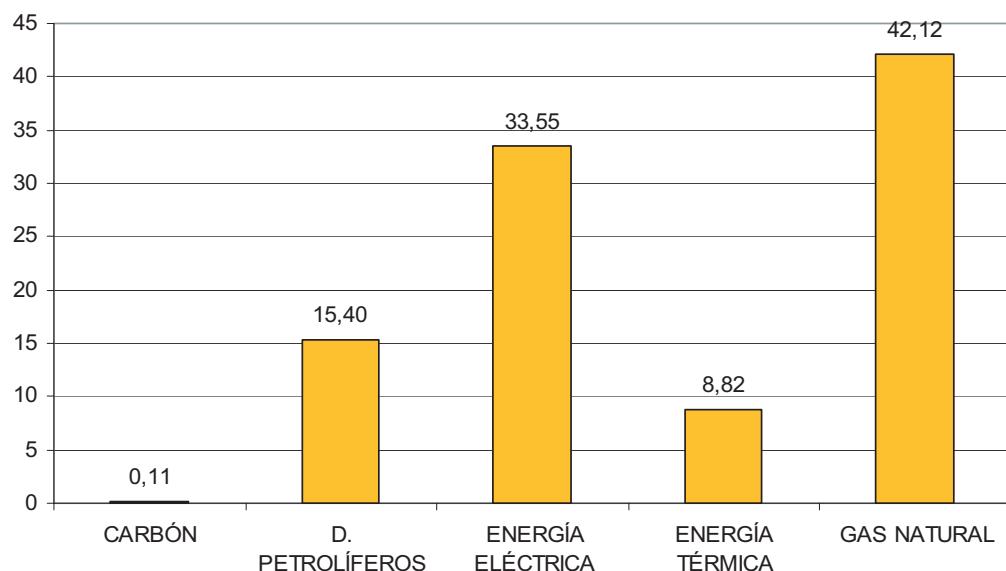
Tal y como se representa en la Fig. 4.10, las empresas industriales se proveen mayoritariamente de gas natural y electricidad (75,7%), y en menor medida de de-

rivados del petróleo (15,40%), siendo el consumo de energía térmica y especialmente de carbón, de carácter residual.

**Tabla 4.5.** Distribución porcentual por tipos de energía y Comunidades Autónomas, 2007.

Comunidades autónomas	Carbón y derivados (%)	Productos petrolíferos (%)	Gas (%)	Electricidad (%)	Otros consumos energéticos (%)	Total consumos energéticos (miles de €)
<b>Total nacional</b>	<b>2,7</b>	<b>17,5</b>	<b>27,8</b>	<b>48,3</b>	<b>3,7</b>	<b>10.980.004</b>
Andalucía	2,9	21,6	24,7	45,6	5,1	1.228.432
Aragón	1,8	15,0	41,8	39,3	2,1	565.628
Asturias (Principado de)	6,2	13,4	18,9	53,9	7,7	463.371
Baleares (Illes)	8,9	25,4	20,1	42,1	3,5	47.448
Canarias	2,6	37,5	8,7	48,6	2,6	107.556
Cantabria	4,6	12,3	26,5	49,3	7,2	232.312
Castilla y León	2,4	21,3	25,7	46,3	4,3	732.764
Castilla-La Mancha	2,4	23,1	30,7	41,2	2,6	593.869
Cataluña	3,3	13,1	28,2	51,7	3,7	2.168.571
Comunitat Valenciana	2,2	12,9	44,3	38,3	2,3	1.433.959
Extremadura	2,6	24,3	22,5	49,7	0,9	124.030
Galicia	1,3	35,6	9,4	50,7	3,1	772.233
Madrid (Comunidad de)	2,3	20,3	21,5	51,9	4,0	695.922
Murcia (Región de)	1,0	26,5	17,1	54,0	1,4	264.823
Navarra (Comunidad Foral de)	2,8	14,3	28,4	52,9	1,5	325.083
País Vasco	2,1	7,5	27,9	57,6	4,9	1.129.918
Rioja (La)	2,0	23,6	21,5	51,0	1,8	94.083

(Fuente: Notas de Prensa en: [www.ine.es/prensa/prensa.htm](http://www.ine.es/prensa/prensa.htm)).



**Figura 4.10.** Estructura del consumo energético de la industria madrileña, 2009

(Fuente: Balance energético de la Comunidad de Madrid 2009).

El sector industrial madrileño se caracteriza por el predominio de pequeñas y medianas empresas transformadoras y de servicios, frente a grandes y primarias que, en general, son las que más energía consumen. Así, según diferentes estudios de mercado consultados, por orden creciente de consumo energético, las actividades industriales se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Los productos minerales no metálicos agrupan las industrias más consumidoras, siendo el gas natural y el fuelóleo los recursos más demandados.
- Le siguen las empresas de transformados metálicos, en las que la electricidad es la fuente más demandada, seguida, pero con una gran diferencia de casi el 50%, por el gas natural y el gasóleo C a mayor distancia todavía.
- Los pequeños establecimientos de alimentación, bebida y tabaco también concentran su gasto energético en el gas y la electricidad.
- Los productos minerales energéticos comparten casi a partes iguales el gasto en electricidad y gas.
- Y, finalmente, el resto de las industrias madrileñas siguen centrando su consumo en la electricidad, el gas y el fuelóleo.

Esta situación implica, como se desprende de la Tabla 4.5, que casi el 94% del coste energético de las industrias madrileñas (696 M€) se invierte en el suministro de electricidad y gas y en la compra de combustibles y carburantes.

El coste energético representa uno de los capítulos más relevantes del total de los restantes costes de producción industrial.

#### **4.4. Actuaciones institucionales en ahorro y eficiencia energética en el sector industrial madrileño**

La importancia estratégica de la actividad industrial para el desarrollo económico de la región y, por otro lado, su significativa contribución al deterioro am-

biental (consumo de recursos no renovables, contaminación edáfica e hídrica, emisiones atmosféricas, vertidos, generación de residuos, etc.), hace necesario implementar mecanismos de mejora integral en el sector, a pesar de que el consumo energético final apenas representa el 4,34% de la consumida a nivel nacional y de que la industria madrileña tiene unas dimensiones bastante limitadas, al no contar con instalaciones especialmente grandes y consumidoras de energía.

No hay industria pesada como la metalurgia, las químicas, la de los minerales metálicos, etc., concentrando su actividad, como ya se ha indicado, en el transporte, el comercio, los servicios y el uso doméstico, principalmente.

Entre otras acciones previstas en el Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012, destacan las relativas a potenciar el ahorro y la eficiencia energética ya que, casi inevitablemente, cualquier cadena productiva necesita consumir una o varias fuentes de energía para su funcionamiento.

Con vistas a alcanzar para el año 2012 el objetivo general de reducción de un 10% en el consumo energético, el Plan ha establecido dos niveles de actuación en relación al ahorro y la eficiencia energética, uno comprende las acciones de carácter horizontal comunes al conjunto de los sectores económicos y otro es específico para cada uno de los mismos.

Las actuaciones más institucionales y generales se centran en:

- ✿ Alcanzar acuerdos con los Ayuntamientos en temas energéticos y en la ejecución de programas municipales subvencionados por el Plan, como es la sustitución del alumbrado público, el fomento de uso de energías renovables, etc.
- ✿ Potenciación del Centro de Ahorro y Eficiencia Energética de Madrid, actual Fundación de la Energía (FENERCOM). Es una institución en la que participan asociaciones y empresas del sector energético junto con la administración autonómica, desde donde se desarrolla una importante labor de difusión y concienciación mediante campañas informativas, la edición de guías técnicas y organización de jornadas, así como la integración de las actuaciones energéticas de la Comunidad en el marco europeo.

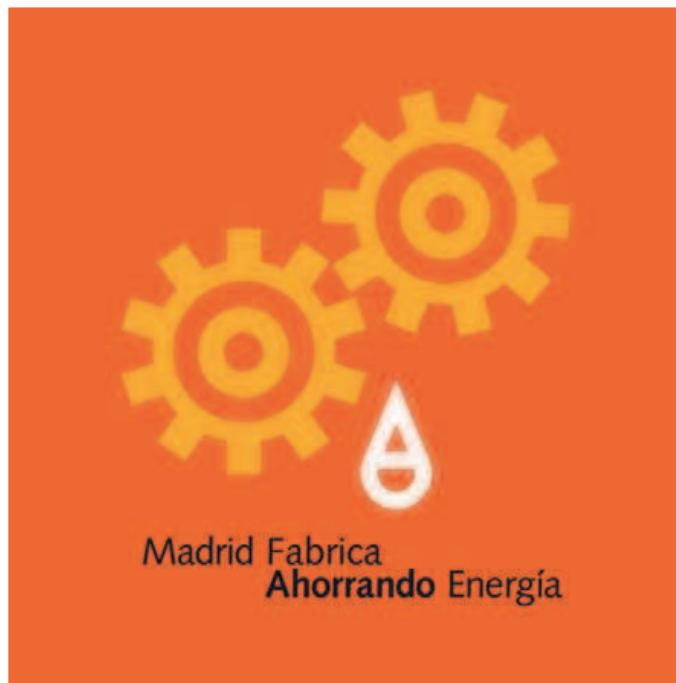
Dicha Fundación tiene como objetivos fundamentales fomentar, impulsar y realizar iniciativas y programas de actuación para investigar, estudiar y apoyar actuaciones de conocimiento, desarrollo y aplicación de las tecnologías energéticas. También persigue una mejora del ahorro y la eficiencia energética, el fomento del uso racional de la energía y, en general, la óptima gestión de los recursos energéticos.

- Desarrollo de normativa energética específica como apoyo técnico en los diversos campos y aplicaciones energéticas desarrolladas por el Plan.
- Fomento de la formación en temas energéticos, mediante la impartición de cursos, seminarios, etc.
- Difusión pública (campañas publicitarias, carteles, folletos, etc.) y concienciación para promover el ahorro energético.

Las medidas de acción específicas que se prevén dentro del Plan Energético para el sector industrial madrileño son:

- Aprovechar las facilidades que proporcionan la ubicación de algunas industrias en polígonos industriales (aunque no para el caso de las explotaciones mineras), para montar servicios comunes y servicios centralizados de tipo energético, incluida la cogeneración.
- Fomentar las auditorías energéticas en todas las facetas de los procesos industriales, edificios, instalaciones, equipos, servicios auxiliares, etc.
- Puesta en marcha de un *Plan Renove para renovación de maquinaria industrial* con tecnologías más modernas y eficaces.

Actualmente, muchas de estas acciones se canalizan a través de la subcampaña denominada *Madrid Fabrica Ahorrando Energía* que la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, tiene lanzada con vistas a fomentar, dentro del sector productivo, el uso de técnicas de producción más eficientes. Destacan las siguientes actuaciones:



**Figura 4.11.** Logo institucional de la Campaña "Madrid Fabrica Ahorrando Energía".

- Realización de auditorías energéticas.
- Publicaciones
  - "Manual de Buenas Prácticas Energéticas en las Empresas Madrileñas".
  - "Guía de Ahorro Energético en Instalaciones Industriales".
- Celebración de jornadas destinadas al sector, destacando algunas específicas como:
  - Jornada sobre Cogeneración y sus aplicaciones (2010).
  - Jornada sobre redes inteligentes de energía y comunicación (2010).
  - Jornada sobre Auditorías Energéticas en el Sector Industrial (2009).
  - Auditorías Energéticas (2008).
  - Energía Solar Fotovoltaica en el Entorno Industrial de la Comunidad de Madrid (2008).
  - Cogeneración en la Comunidad de Madrid (2008).

El programa de ayudas al ahorro y la eficiencia energética para el ejercicio 2010 de la Comunidad de Madrid, suscrito a través del convenio de colaboración

existente desde el año 2008 entre el IDAE y la Consejería de Economía y Hacienda, asciende a 49,5 M€, correspondiendo el 13,56% del montante total al sector industrial con un presupuesto de 5,17 M€.

Estas ayudas se concretan en una serie de programas y planes renove promovidos por la Dirección General de Industria, Energía y Minas , Tabla 4.6.

**Tabla 4.6.** Ayudas para ahorro y eficiencia energética, Ejercicio 2010.

(Fuente: PROGRAMAS DE FOMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA COMUNIDAD DE MADRID).

Dirección General de Industria, Energía y Minas	Fundación de la Energía
Programa Ahorro y Eficiencia Energética (4,5 M€)	Plan Renove de Ascensores (1,5 M€)
Plan Renove de Maquinaria Industrial (0,45 M€)	Plan Renove de Aparatos Domésticos de Gas (4,6 M€)
Plan Renove de Electrodomésticos (7,5 M€)	Plan Renove de Salas de Calderas (7,4 M€)
Plan Renove de Ventanas en Edificios de Viviendas (4,5 M€)	

Para los sectores industriales, estas ayudas se han centrado en la subvención parcial de determinadas actuaciones previamente solicitadas:

- ✿ 50% de la inversión subvencionable para auditorías energéticas.
- ✿ 22% del coste elegible para la sustitución de equipos e instalaciones industriales de proceso de grandes empresas.
- ✿ 30% del coste elegible, también en grandes empresas, para la sustitución de equipos auxiliares transformadores de energía.



# La energía en las explotaciones mineras de la Comunidad de Madrid

## 5.1. La minería en la Comunidad de Madrid

Según la Estadística Minera Anual de 2007 (Secretaría de Estado de Energía del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio), la Comunidad de Madrid ocupa el séptimo puesto de dieciocho, en cuanto al valor de la producción minera vendible, con cerca de 257 M€ de los 4.465 M€ totales.

La importancia de algunas de las explotaciones que sustenta, destacando las de sulfato sódico (glauberita), sepiolita, granito ornamental y yeso, principalmente, hacen que Madrid sea, fundamentalmente, una provincia de referencia dentro del panorama minero nacional.



**Figura 5.1.** Distribución por comunidades autónomas del valor de la producción minera - 2007.

La situación actual en la Comunidad de Madrid por sustancias explotadas se refleja en la Tabla 5.1. Se puede observar que la producción anual de estas explotaciones se sitúa en 27.648.490 t de mineral vendible.

**Tabla 5.1.** Resumen de la actividad minera durante los años 2007 y 2008.

SUSTANCIA	EXPLOTACIONES CON PRODUCCIÓN		VALOR PRODUCCIÓN (€)		PRODUCCIÓN (t)	
	AÑO 2007	AÑO 2008	AÑO 2007	AÑO 2008	AÑO 2007	AÑO 2008
AGUA MINERAL	1	1	6.000	6.000	40	40
ARCILLA	5	7	570.274	1.125.198	630.225	766.847
CALIZA <sup>(1)</sup>	25	25	31.086.789	31.019.292	12.569.929	12.092.350
FELDESPATO	1	-	0	-	0	-
GLAUBERITA	1	1	15.713.466	10.852.520	274.956	433.160
GRANITO <sup>(2)</sup>	20	18	10.393.070	10.014.810	1.338.733	1.337.660
GRAVAS Y ARENAS	35	39	28.654.462	28.391.342	10.547.089	8.523.444
PÓRFIDO	1	1	61.690	69.550	12.900	12.900
SEPIOLITA-BENTONITA	10	10	4.478.147	22.464.735	571.871	697.610
YESO	12	11	4.285.611	3.857.936	1.702.746	1.344.281
<b>TOTAL</b>	<b>111</b>	<b>114</b>	<b>95.429.509</b>	<b>107.801.383</b>	<b>27.648.490</b>	<b>25.208.29</b>

(Fuente: Memoria Anual; 2007 y 2008. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Economía y Hacienda).

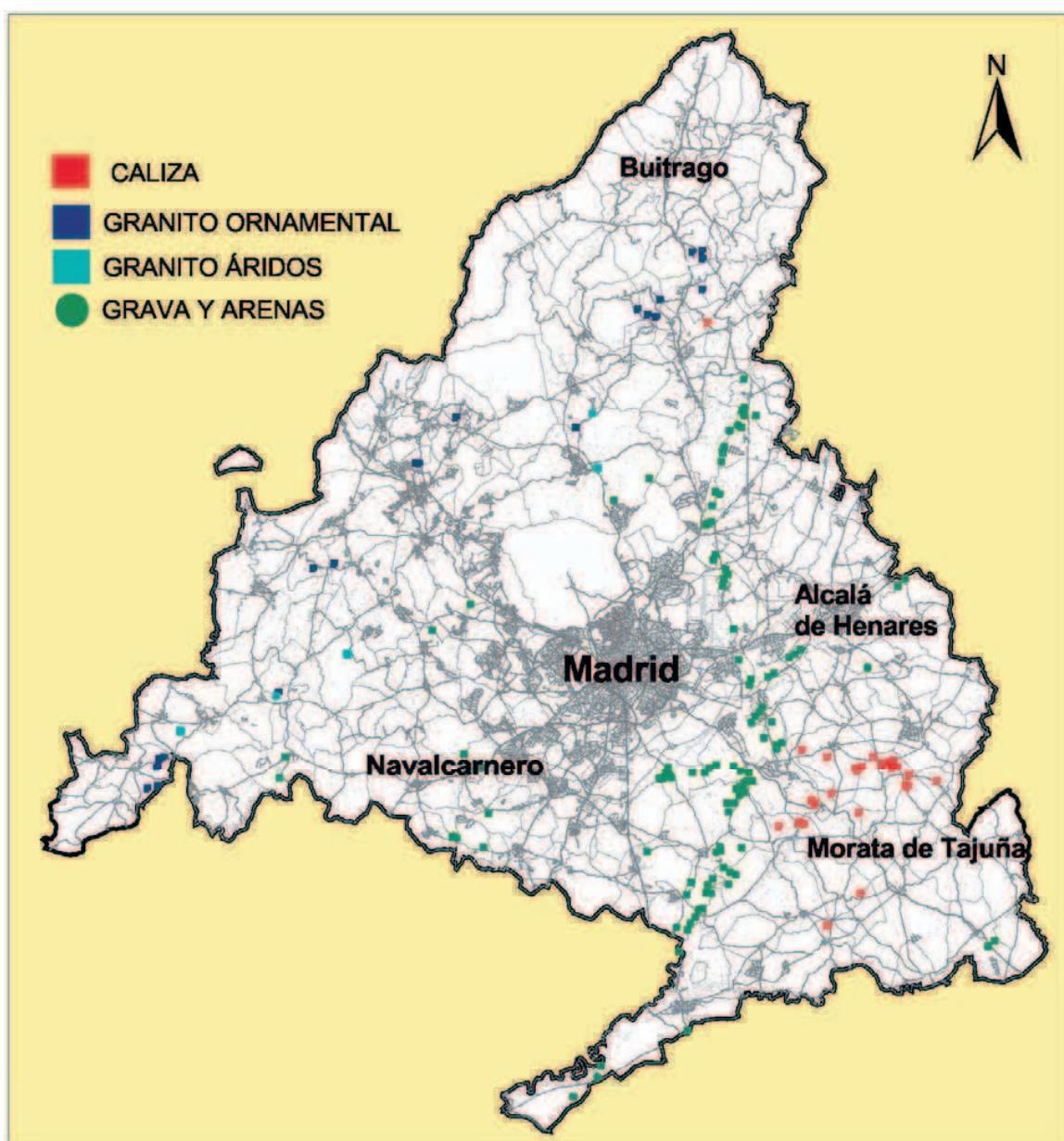
(1) Las producciones y los valores de producción de las calizas para áridos, rocas ornamentales, cemento, carbonato cálcico u óxido de cal se registran integradas.

(2) Las producciones y los valores de producción de granito para usos ornamentales y construcción se registran integradas.

Actualmente hay 233 derechos mineros otorgados, entre concesiones y autorizaciones de explotación y 104 expedientes en trámite.

La actividad extractiva en Madrid queda repartida entre productos de cantera, que constituye el sector de la minería española que más ha crecido, rocas ornamentales y minerales industriales.

Aunque la explotación de productos de cantera para la obtención de áridos naturales también conforma el sector minero madrileño más productivo alcanzando la suma de sus producciones más del 55% del total, y con mayor número de explotaciones activas, con 64 canteras y graveras de las 114 registradas el año



**Figura 5.2.** Distribución geográfica de las explotaciones mineras productoras en la Comunidad de Madrid

(Fuente: Plan Director de la Minería de la Comunidad de Madrid, 2002).

2008 según la Comunidad de Madrid, son los minerales industriales seguidos por las rocas ornamentales, los sectores más representativos de la minería madrileña por su repercusión nacional e internacional.

Las explotaciones activas de minerales industriales representan más del 30%

del valor de la producción vendible nacional, con más de 33 M€, cobrando especial relevancia la sepiolita entre las arcillas especiales y la glauberita para la producción de sulfato sódico. La Comunidad de Madrid posee el 80% de las reservas mundiales de sepiolita además de ser la mayor productora a nivel internacional. Respecto al sulfato sódico, Madrid también cuenta con una de las cuatro únicas explotaciones existentes en Europa.

Según el censo nacional de 2007 (Estadística Minera Anual 2007), de las explotaciones de rocas ornamentales existentes a nivel provincial destacan las de granito ornamental de la sierra y rampa madrileña, siendo la suma total de sus producciones superior a 15 M€. La Comunidad de Madrid ocupa después de Galicia, el segundo puesto en la producción nacional de este tipo de roca en bruto.

En cuanto al valor unitario de la producción vendible, las explotaciones de minerales industriales son las que alcanzan el mayor índice con más de 3 M€ por explotación activa, seguidas de las de roca ornamental, con 0,94 M€ por establecimiento. En cuanto a las canteras y graveras, su producción vendible unitaria ronda los 0,72 M€.

A excepción de las explotaciones de granito que se sitúan fundamentalmente en la Sierra (Dominio Hercínico), el resto se concentran en su mayoría en la Depresión o Cuenca del Tajo, que ocupa el centro y el sureste madrileño, constituida casi en su totalidad por materiales de naturaleza detrítica (arenas y arcillas), con facies químicas y lagunares (calizas y yesos), pertenecientes en su mayoría al Terciario. La extracción de gravas y arenas se desarrolla a lo largo de los principales ríos de la comunidad: Tajo, Jarama, Tajuña, y Henares, fundamentalmente.

La superficie afectada por las explotaciones mineras es muy escasa en el conjunto superficial madrileño. De los 8,025 km<sup>2</sup> que ocupa la Comunidad de Madrid, sólo se ve afectado menos del 0,5% de su territorio, 3.397 ha, estando restauradas hasta el momento unas 2.302 ha correspondientes al 67,8% de la superficie minera.

En el año 2008 la Comunidad de Madrid disponía de casi 43 M€ en avales exigidos y depositados para hacer frente a los trabajos de restauración.



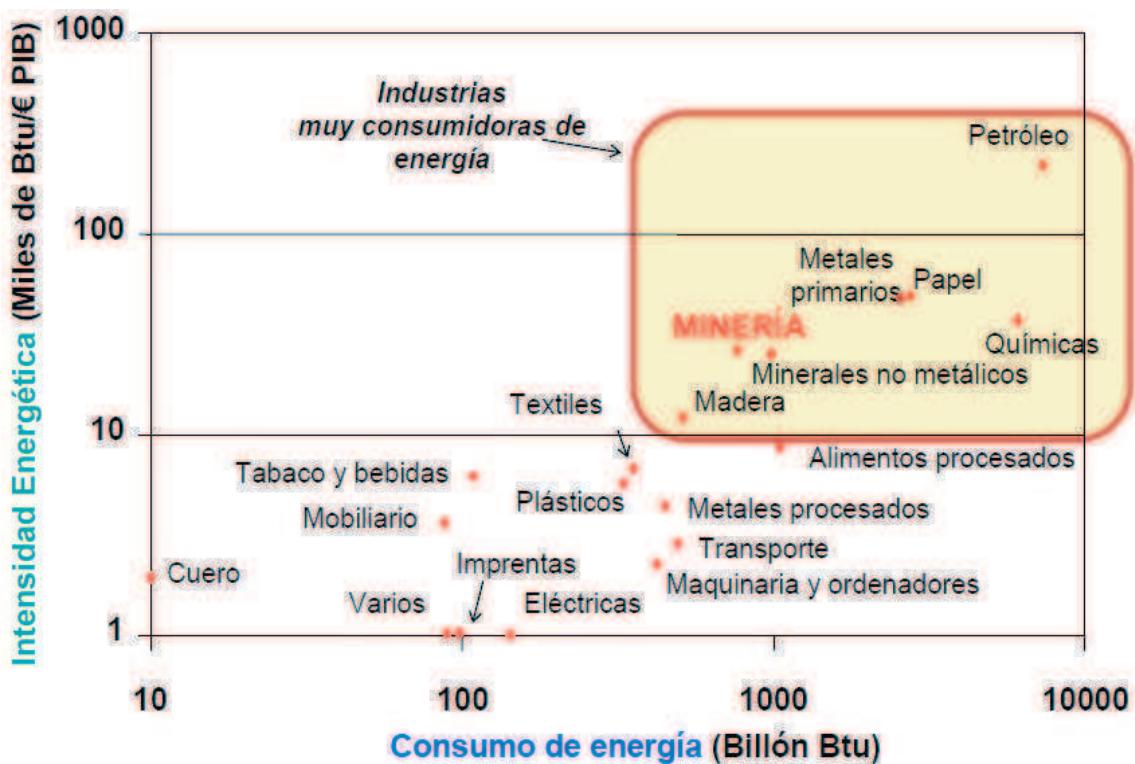
**Figura 5.3.** Distribución geográfica de las áreas mineras  
(Fuente: Comunidad de Madrid).

## 5.2. Energía consumida por las explotaciones mineras madrileñas

Como cualquier otra actividad humana, la minería genera una serie de efectos ambientales, entre los que destaca el consumo de recursos naturales inclui-

dos los energéticos, siendo la cantidad de explosivos y combustibles, junto con el consumo de electricidad debido a los motores, los factores más influyentes.

Según la *Energy Information Administration (EIA)* de Estados Unidos, la minería en su conjunto se considera un tipo de actividad *muy consumidora de energía*, situándose a un nivel inferior a la industria petrolera, pero similar a la papelera y la química.



**Figura 5.4.** La minería como sector industrial consumidor de energía (Fuente: EIA 2001. 1998 Manufacturing Energy Consumption Survey. U.S. DOE 2002. Energy and Environmental Profile of the U.S. Mining Industry).

A partir de la Estadística Minera de España del año 2007, elaborada anualmente por el Ministerio de Industria conforme a la información facilitada por las propias empresas, se han obtenido unos índices de consumo medio de energía en las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid, los cuales se resumen en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2.** Consumo medio de energía en las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid (2007)

SUSTANCIA	EXPLOTACIONES	PRODUCCIÓN MEDIA (t/h)	CONSUMO GASOIL (l/t)	CONSUMO ENERGÍA ELÉCTRICA (kWh/t)
GRANITO	6	160	0,75	2.44
CALIZA	23	550	0,43	1.69
ARENAS Y GRAVAS	35	220	0,60	2.39

(Fuente: Estadística Minera Anual 2007

<http://www.mityc.es/energia/mineria/Estadistica/Paginas/Consulta.aspx>



## 6.1. Consumo de energía

La evaluación de los aspectos energéticos de las explotaciones mineras, con vistas a potenciar el ahorro y mejorar su eficiencia, se ha centrado en las canteras de áridos, dado que la extracción de rocas industriales para la obtención de productos de cantera mediante procesos de machaqueo, lavado, molienda y clasificación son las más numerosas en la Comunidad de Madrid.

La sistemática de evaluación de los aspectos energéticos significativos (aquellos que tienen o pueden tener un impacto significativo en el uso de la energía), deben considerar:

- Los usos pasados y presentes basados en mediciones y otros datos.
- La identificación de las actividades/operaciones, productos y servicios, equipos y/o sistemas con influencia en el uso de la energía.
- La identificación de las personas/funciones de la organización con influencia en el uso de la energía.
- La identificación de las fuentes de energía utilizadas, y potencial de uso de energías renovables o energías no usadas por la organización, propias o de terceros.
- La seguridad y calidad del aprovisionamiento energético.

**Figura 6.1.** Criterios para realizar una evaluación energética dentro de un proceso productivo.

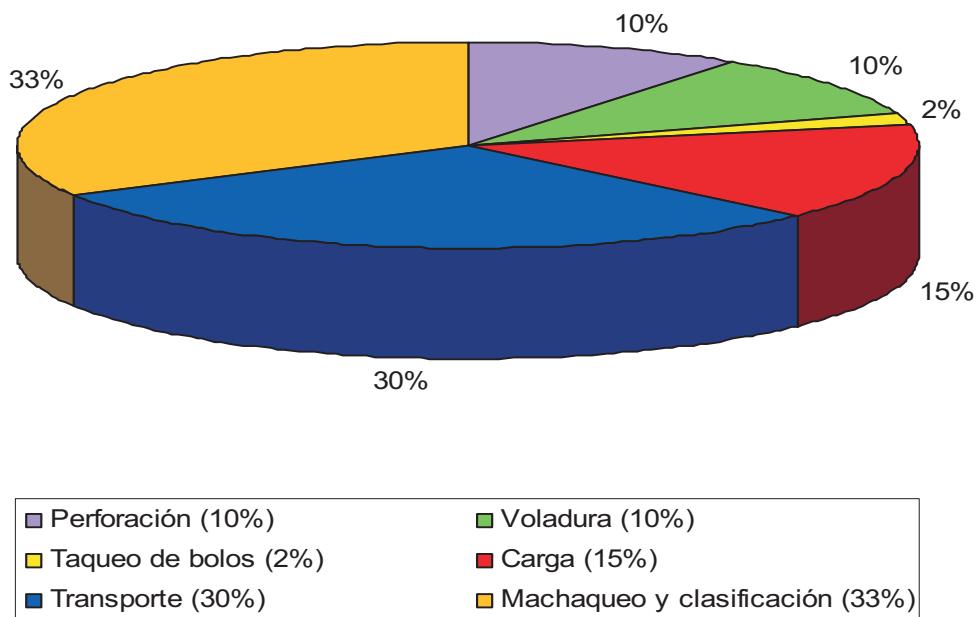
Tanto en las canteras de áridos como en el resto de las explotaciones mineras, el consumo de energía constituye una partida muy importante de los costes de producción.

El coste total de producción unitario (€/t) está compuesto por la suma de los costes unitarios de las diferentes operaciones que constituyen el ciclo de producción.

De forma genérica, el ciclo básico de producción de una cantera está formado por las siguientes labores mineras, cada una de ellas desarrollada con una maquinaria y equipos específicos, y con un consumo de energía específico:

- ✿ Perforación.
- ✿ Voladura.
- ✿ Carga.
- ✿ Transporte:
  - Volquetes.
  - Cintas transportadoras.
- ✿ Tratamiento mediante trituración, clasificación y lavado realizado en plantas:
  - Fijas.
  - Semimóviles.
  - Móviles.

A título orientativo, la estructura típica de costes en una cantera de áridos de machaqueo es la siguiente:



**Figura 6.2.** Estructura de costes.

Siguiendo una distribución similar a la de costes, la cantidad total de energía consumida está formulada por el sumatorio de las energías empleadas en el conjunto de las operaciones mineras.

$$E = Ep + Ev + Eb + Ec + Et + Em + Etcl$$

Siendo :

E = Energía total consumida

Ep = Energía consumida en la perforación

Ev = Energía consumida en la voladura

Eb = Energía consumida en el taqueo de bolos

Ec = Energía consumida en la carga

Et = Energía consumida en el transporte

Em = Energía consumida en la manipulación de productos finales

Etcl = Energía consumida en la trituración y clasificación

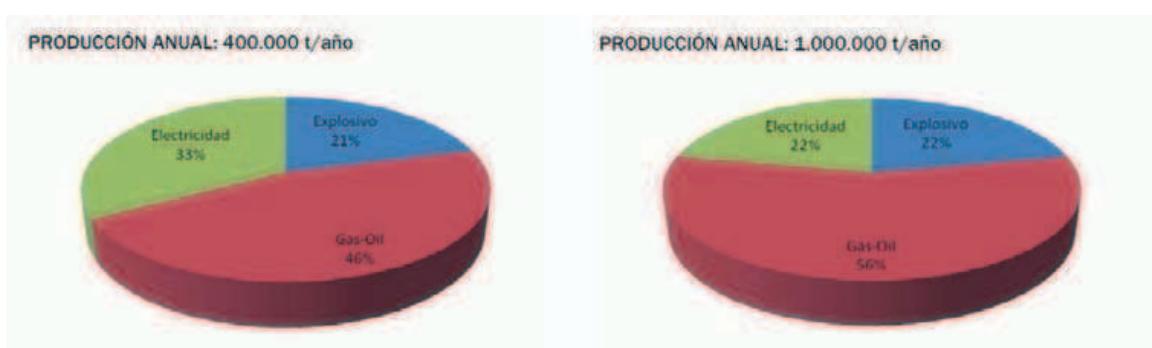
**Figura 6.3.** Energía total consumida.

Los tipos de energía empleados son diferentes en función de las características de los materiales extraídos, los tipos de maquinaria utilizada y el sistema de abastecimiento empleado. En una cantera de machaqueo, la energía que fundamentalmente se emplea es química y eléctrica, además de mecánica:

- En la perforación, los equipos actuales están accionados por un motor térmico de gasoil, por lo que se consume un combustible derivado del petróleo, pudiendo así afirmarse que es una energía de tipo químico.
- En las voladuras, también se emplea energía de tipo químico además de mecánica, ya que son los explosivos los que, en su proceso de detonación, consiguen la fragmentación de la roca mediante diversos mecanismos de rotura, vinculados a lo que se conoce como energía de tensión y energía de burbuja del explosivo.

- El taqueo de bolos se realiza mediante un martillo hidráulico montado sobre una excavadora hidráulica que consume gasoil, siendo igualmente química la energía empleada.
- La carga y el transporte, realizada normalmente con palas de ruedas, excavadoras hidráulicas y volquetes, también consumen gasoil. Sólo en el caso de disponer de machacadoras móviles y de cintas se consumiría energía eléctrica.
- En la preparación mecánica y clasificación de los áridos, mediante las diferentes etapas de trituración y clasificación, se consume energía eléctrica.

Por otro lado, la distribución de costes de energía en las canteras depende de la producción anual.



**Figura 6.4.** Costes de energía según la producción anual.

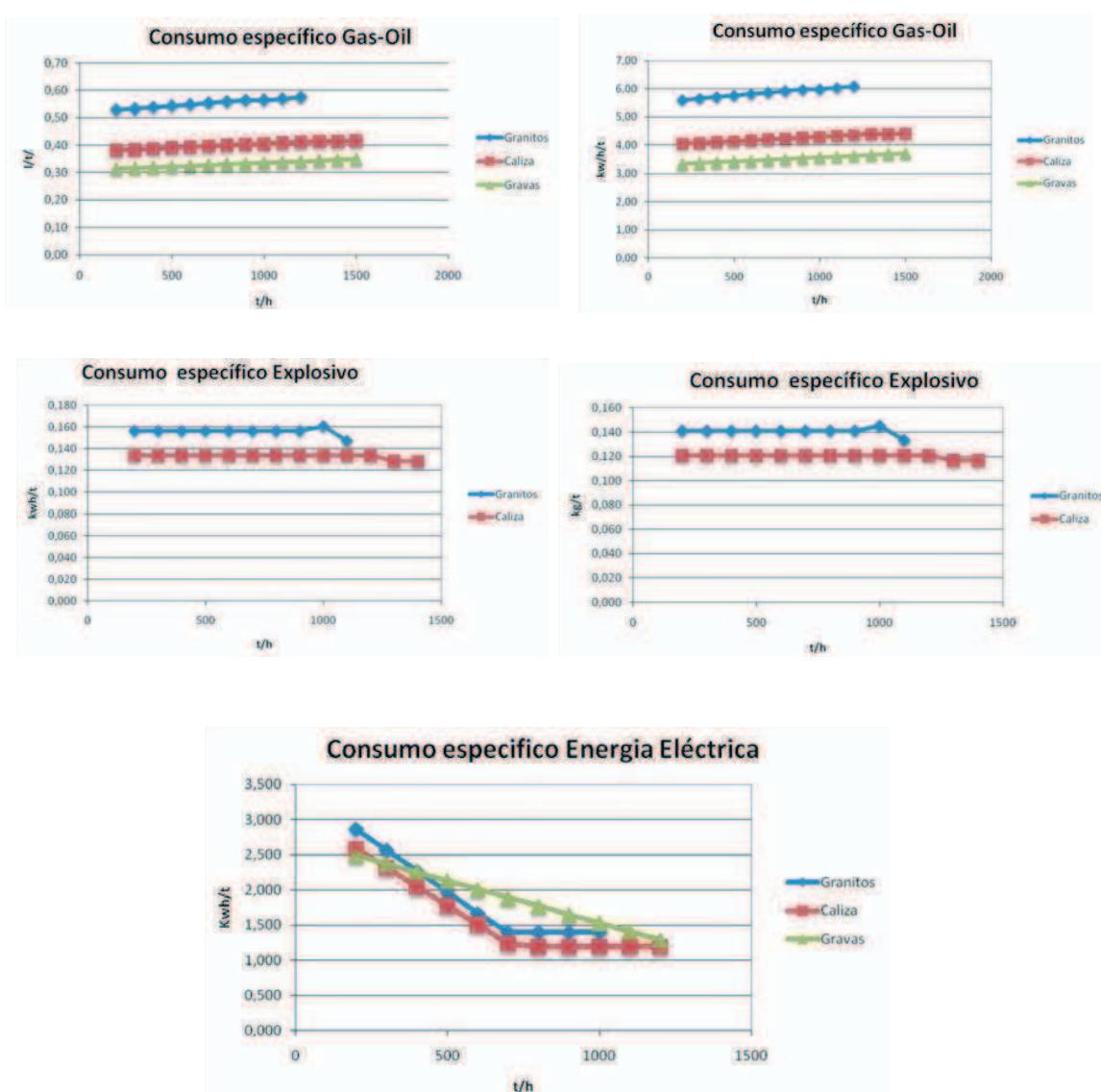
Es por ello que, el consumo energético en una cantera se puede expresar finalmente como la suma de los consumos de gasoil, explosivo y energía eléctrica en la planta.

A su vez, el consumo de gasoil, se compone de los siguientes conceptos:

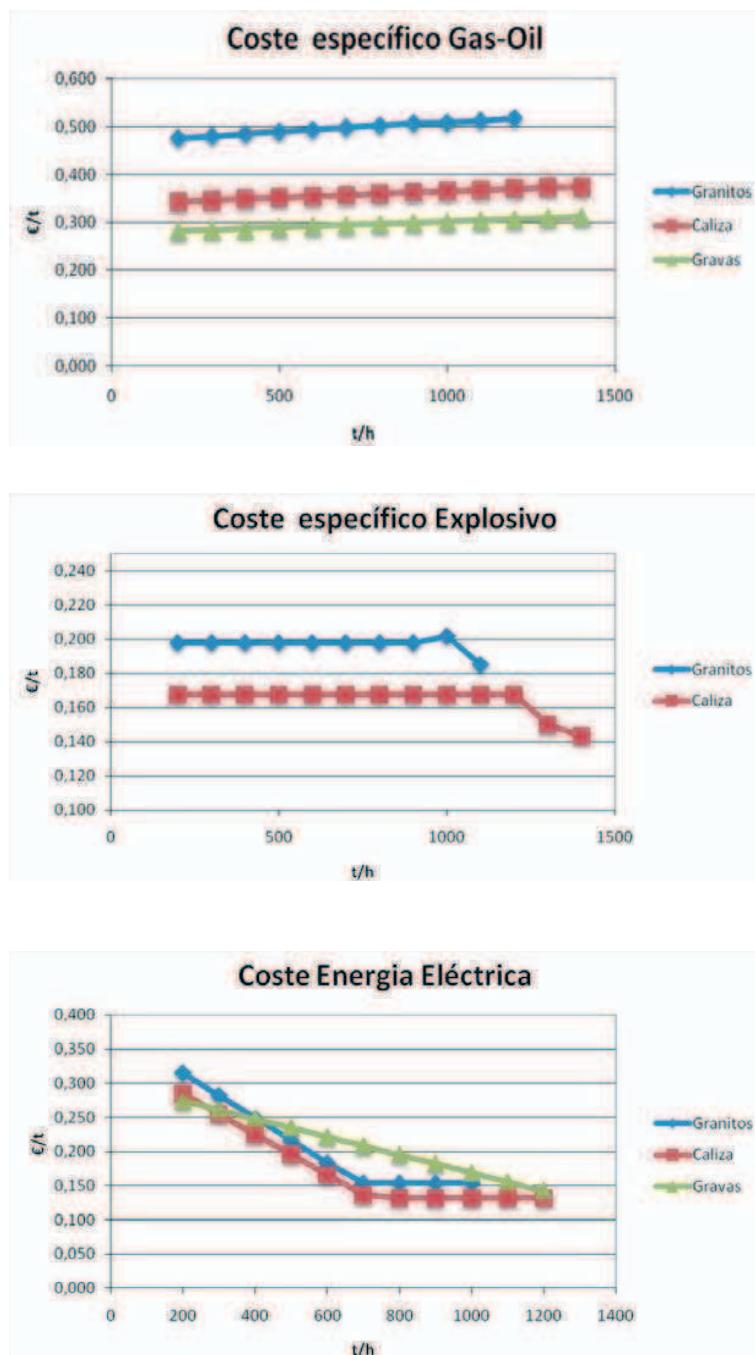
- Perforación.
- Taqueo de bolos.
- Carga.
- Transporte del frente a planta, incluyendo mantenimiento de pistas.
- Manipulación.

En el caso de graveras, al no requerirse voladuras, desaparecen los dos primeros conceptos.

En las Figs. 6.5 y 6.6 se proporcionan los gráficos de consumos y costes específicos de gasoil, explosivos y energía eléctrica para granito, caliza y grava, en función de la producción horaria, determinados a partir de un *Estudio diagnóstico sobre el consumo y la eficiencia energética realizado en las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid*.



**Figura 6.5.** Consumos específicos para diversas rocas industriales, por producción horaria.

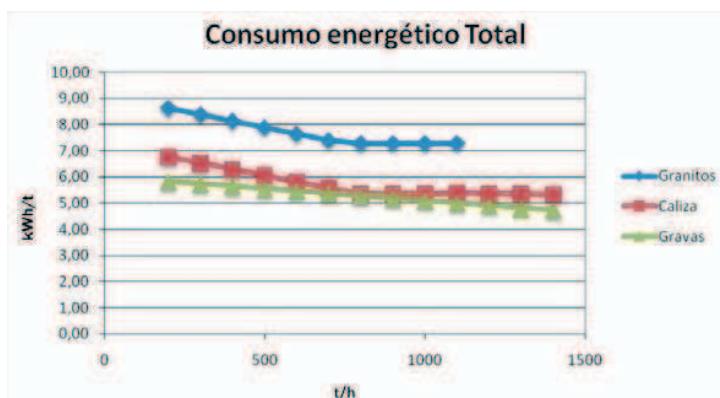


**Figura 6.6.** Costes específicos de gasoil, explosivo y energía eléctrica en función del tipo de material y la producción horaria.

Algunas de las principales conclusiones que se pueden extraer del citado estudio señalan que:

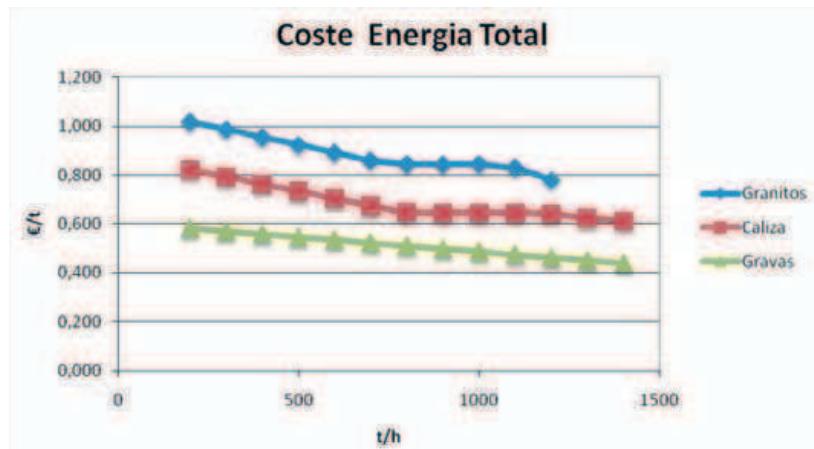
- En la perforación, el consumo disminuye ligeramente con un aumento importante en la producción.
- En el taqueo de bolos y el transporte, el consumo específico no varía con la producción horaria, siempre que se mantenga la distancia de transporte.
- En la carga y manipulación, el consumo específico empeora ligeramente con la producción horaria.
- En la voladura, el consumo y el coste de explosivos son casi independientes de la producción, salvo para producciones muy altas, superiores a 1.000 t/h, en los que se observa una disminución. Esta situación destaca más significativamente en el caso de las explotaciones de granito que en las de caliza.
- Respecto a la energía eléctrica consumida en las plantas de tratamiento, los resultados correspondientes a las rocas estudiadas indican que, conforme aumenta la producción horaria, el consumo y coste de la electricidad empleada disminuye hasta alcanzar un valor casi constante, independiente de la producción. Este descenso es más acentuado en el caso del granito y la caliza que en el de las gravas, donde la influencia de la producción es mayor.

Por último, se ha representado el consumo energético total expresado en kWh/t , como la suma del gasoil, el explosivo y la energía eléctrica, en función del tipo de roca y de la producción horaria, Fig. 6.7.



**Figura 6.7.** Consumos de energía total para diversas rocas industriales, por producción horaria.

Puede observarse que el consumo en kWh, sólo es ligeramente superior en la caliza sobre la grava, debido a la baja eficiencia energética de las plantas de grava.



**Figura 6.8.** Costes de la energía total consumida para diversas rocas industriales, por producción horaria

En este caso, sí hay una fuerte disminución del coste con la producción horaria.

## 6.2. Eficiencia energética en canteras

El potencial de ahorro energético se puede determinar mediante índices de eficiencia energética. La mejora del coeficiente de eficiencia representa un determinado nivel de ahorro.

Estos índices o indicadores de eficiencia energética se diseñan para poder analizar la eficiencia energética de una determinada actividad y controlar los cambios en el uso de la energía. También permiten comparaciones entre escenarios diferentes con variadas situaciones de eficiencia energética, tanto internas como a nivel nacional e internacional.

Existen dos tipos de indicadores para describir estos procesos: los índices económicos, más utilizados a nivel institucional (entre países, sectores de la econo-

mía nacional o internacional, etc.), y los índices tecno-económicos, en los que es posible caracterizar una determinada actividad mediante datos técnicos o coeficientes (PRIEN; 2003).

Los tecno-económicos, también llamados *consumo unitario*, generalmente se calculan de forma desagregada (por sectores, subsector o uso final), relacionando la energía consumida (tep, litros gasoil, kWh, etc.) con indicadores de la actividad medidos en términos físicos (toneladas de producción, kilómetros, metros cuadrados de vivienda, etc.).

Estos indicadores o consumos unitarios presentan ciertas desventajas, ya que no suelen reflejar los verdaderos consumos de energía asociados a la producción de un determinado bien, salvo que se siga la cadena de producción completa. Además, la posibilidad de comparar los consumos específicos se encuentra también limitada por las características de los distintos procesos productivos; por ejemplo, no es igual la eficiencia energética relativa de la producción de una tonelada de árido a partir de gravas, y la producción de la misma tonelada a partir de caliza o granito.

Según la bibliografía consultada, para relacionar la eficiencia energética y la eficiencia económica a un nivel más global, también se puede utilizar el indicador denominado *Índice de Intensidad Energética*, que se define como la razón entre el consumo de energía de una o un conjunto de actividades económicas y el valor del producto de dichas actividades. Si bien su utilización es bastante restringida, ya que sólo es recomendable en el caso de análisis muy desagregados, siendo necesario conocer muy en detalle los procesos analizados.

Dado que esta Guía se centra en un subsector de la minería muy concreto, se considera que el uso de índices de tipo tecno-económicos es suficientemente adecuado para caracterizar la eficiencia energética en explotaciones de áridos y el potencial de ahorro de las distintas actividades que las integran.

Por ello, partiendo de los datos de consumo y coste energético es posible definir unos índices de eficiencia energética (IE) distintos para gravas, calizas y granitos, pero cuya expresión general común respondería a la fórmula indicada en la Fig. 6.9.

$$IE = K1 \times Cgo + K2 \times Cex + K3 \times Cee$$

donde :

- IE = Índice de Eficiencia Energética (kWh/t)
- Cgo = Gasoil (l/t)
- Cex = Explosivo (kg/t)
- Cee = Energía eléctrica (kWh/t)
- K1, K2 = Constantes de eficiencia energética

**Figura 6.9.** Índice de Eficiencia Energética.

Los factores implicados vendrán expresados en sus correspondientes unidades según se trate determinar un IE ligado al consumo energético (kWh/t) o al coste energético (€/t); así se tendría:

- IE:** Eficiencia energética, expresado en kWh/t o €/t
- Cgo:** Consumo de gasoil (l/t)
- Coste de gasoil (€/t)
- Cex:** Consumo de explosivo (kg/t)
- Coste de explosivo (€/t)
- Cee:** Consumo energía eléctrica (kWh/t)
- Coste energía eléctrica (€/t)
- K1,K2,K3:** Constantes de eficiencia energética

Los valores de K1, K2 y K3 dependen del tipo de explotación y método empleado. En la Tabla 6.1 se exponen unos valores medios de K1, K2 y K3 para las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid.

**Tabla 6.1.** Valores medios de las constantes de eficiencia energética K para áridos en la Comunidad de Madrid (Fuente: Comunidad de Madrid).

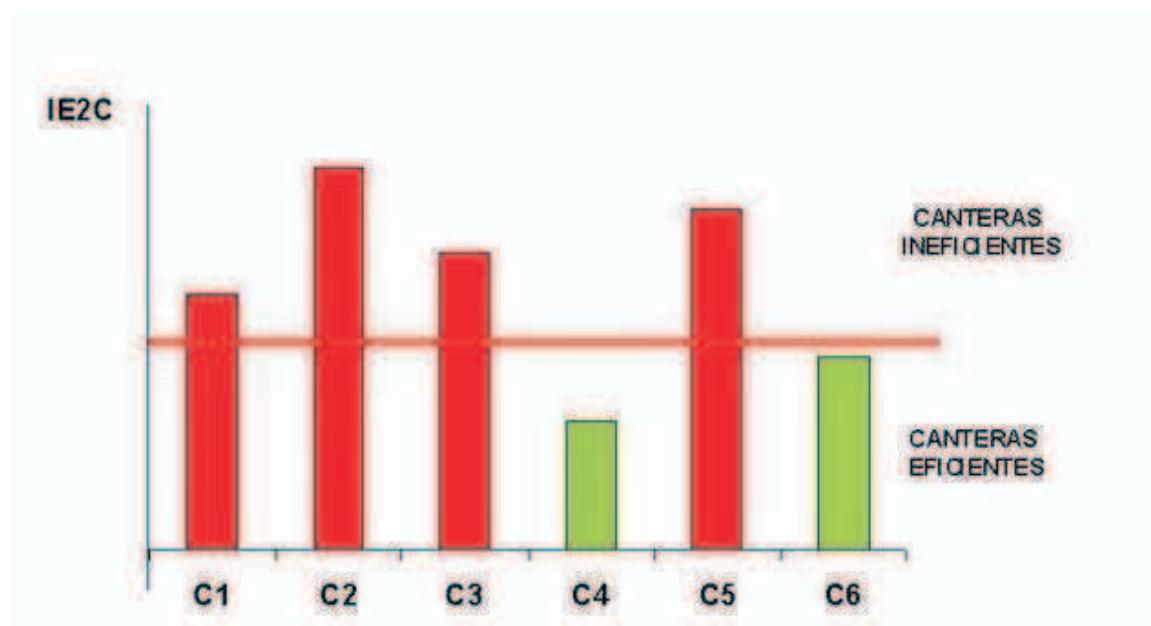
SUSTANCIA	K1 (Gasoil)		K2 (Explosivo)		K3 (Energía eléctrica)	
	IE CONSUMO (kWh/l)	IE COSTE (€/l)	IE CONSUMO (kWh/t)	IE COSTE (€/t)	IE CONSUMO (kWh/t)	IE COSTE (€/t)
<b>GRANITO</b>		<b>0,49 (€/l)</b>		<b>0,22 (€/l)</b>	1 (kWh/t)	<b>0,29 (€/l)</b>
<b>CALIZA</b>	10,6 (kWh/l)	<b>0,56 (€/l)</b>	GOMA: 1,148 (kWh/kg) NAGOLITA: 1,092 (kWh/kg)	<b>0,22 (€/l)</b>	1 (kWh/t)	<b>0,23 (€/l)</b>
<b>ARENAS Y GRAVAS</b>		<b>0,56 (€/l)</b>		-	1 (kWh/t)	<b>0,44(€/l)</b>

Del diagnóstico sobre consumo y eficiencia energética realizado en las explotaciones de áridos de la Comunidad de Madrid se han obtenido unos valores de referencia de los índices de eficiencia, los cuales se exponen en la Fig. 6.10.

RESPECTO AL CONSUMO ENERGÉTICO	RESPECTO AL COSTE ENERGÉTICO
<b>IE GRANITO = 7,54 kWh/t</b>	<b>IE GRANITO = 0,33 €/t</b>
<b>IE CALIZA = 5,19 kWh/t</b>	<b>IE CALIZA = 0,24 €/t</b>
<b>IE GRAVA = 4,87 kWh/t</b>	<b>IE GRAVA = 0,24 €/t</b>

**Figura 6.10.** Índices de Eficiencia Energética (IE) de referencia para granito, caliza y gravas en la Comunidad de Madrid.

Una vez calculado el IE en cada explotación de granito, de caliza o de gravas y arenas, se comparará con el IE de referencia en cada caso, para determinar el grado de eficiencia o ineficiencia de la cantera en estudio.



**Figura 6.11.** Índice de eficiencia energética en canteras  
(Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

La aplicación de estos índices de eficiencia en una muestra representativa de las explotaciones activas de áridos de la Comunidad de Madrid ha permitido extraer algunas conclusiones interesantes sobre la situación actual de este sector en la región en cuanto a consumos de energía y costes, destacando las siguientes (Comunidad de Madrid, 2010):

- ✿ En general, las graveras presentan una baja eficiencia energética, debido al alto consumo de gasoil y a la baja eficiencia energética eléctrica, especialmente en producciones bajas y medias.
- ✿ Por debajo de 900 t/h las canteras de caliza son ineficientes en el consumo de gasoil, y por encima, el 50% son eficientes y el otro 50% ineficientes. En el consumo de energía todas son eficientes por encima de 550 t/h, y en cuanto a consumo de explosivo, todas son eficientes por encima de 900 t/h, y el 86% por encima de 400 t/h.
- ✿ Las explotaciones de granito para áridos son ineficientes, mejorando su índice para producciones superiores a 500 t/h. La eficiencia está directamente relacionada con el consumo de gasoil. En relación al consumo de explosivos son explotaciones eficientes, independientemente de la producción. En cuanto al consumo energético también mejora con la producción.

Estas conclusiones ponen de manifiesto la necesidad de optimizar el proceso de obtención de los áridos, para potenciar el ahorro y la eficiencia energética en estas explotaciones mineras.

### 6.3. Mejora de la eficiencia energética en canteras

La mejora de la eficiencia energética en una cantera de áridos se tiene que acometer con un enfoque sistémico, ya que todo el proceso de producción está integrado por un conjunto de operaciones que, si bien pueden parecer independientes unas de otras, están interrelacionadas entre sí.

En opinión de diversos autores especialistas en la materia, la aproximación a

la eficiencia energética de una cantera se debe abordar en diferentes etapas, las cuales se han representado en la Fig. 6.12:

- Etapa 1. Optimización del ciclo de producción a través de la fragmentación obtenida en las voladuras, ya que permite la reducción del consumo energético en las operaciones posteriores: carga, transporte y trituración primaria, secundaria y terciaria.
- Etapa 2. Optimización del sistema de explotación, que constituye la etapa más importante ya que aporta el mayor potencial de ahorro.
- Etapa 3. Incorporación de nuevas tecnologías para la mejora de la eficiencia energética de procesos, equipos, etc.



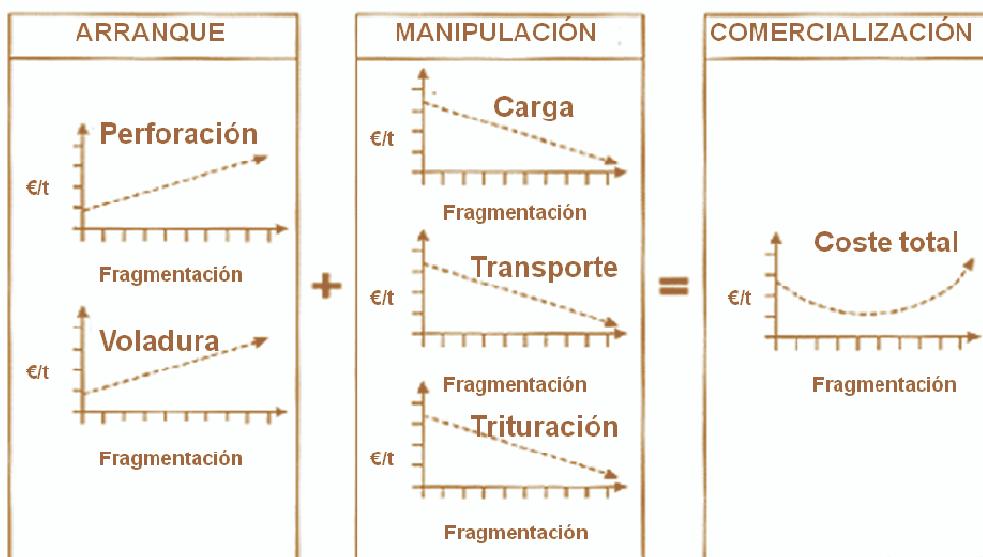
**Figura 6.12.** Pirámide de la eficiencia energética en canteras (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

Dependiendo del estado de desarrollo del proyecto, puede que se altere la consecución de alguna de esas etapas pues, para una cantera de nueva apertura es posible que la etapa 2 se realice antes que la etapa 1, mientras que si la can-

teria está en marcha y se trata de sustituir equipos el orden de ejecución es el indicado.

### 6.3.1. Optimización del ciclo de producción a través de la fragmentación de las voladuras

Según estudios realizados al respecto, el coste de cada una de las operaciones mineras está íntimamente relacionado con la fragmentación de la roca, situación que a su vez afecta al conjunto del proceso productivo. Por ello, el control de las voladuras constituye una etapa fundamental en la mejora de la eficiencia energética de una cantera de áridos.



**Figura 6.13.** Optimización de los costes a partir de la fragmentación de la roca (Fuente: Technical University, Trondheim, Norway, en <http://www.metso.com>).

Por otra parte, como ya se ha indicado, y dado que el consumo energético de una explotación está directamente relacionado con los costes de producción, la mejora de la eficiencia energética pasa por minimizar el coste total unitario.

Esta primera etapa de mejora de la eficiencia energética trata de aproximarse al menor coste total unitario mediante la comparación de distintos escenarios de trabajo en los que el dato de partida es una determinada fragmentación

de la roca, es decir del todo uno, conseguida con un determinado esquema de perforación y voladura y, consecuentemente, con un consumo específico de explosivo dado, y distribución de la carga.

Hasta épocas recientes, los responsables del área de perforación y voladuras realizaban su gestión de manera totalmente independiente, reduciendo en ocasiones los costes de dicho proceso sin darse cuenta que, con esa manera de proceder, inducían sobrecostes en el resto de operaciones, aguas abajo, del ciclo de producción. Esta situación se acentúa aún más cuando la operación de arranque con explosivos está subcontratada y la citada operación no recibe el grado de atención requerido por la dirección de la cantera, o no tiene lugar la transferencia de información entre los responsables de las distintas áreas.

Para conseguir una fragmentación o granulometría fina se precisa un mayor consumo de energía en perforación, pues los esquemas son más cerrados y la perforación específica aumenta (metros de barreno/m<sup>3</sup>). El consumo de energía en la voladura aumenta debido a los mayores consumos específicos y al empleo de explosivos más potentes.

Al mismo tiempo, la energía consumida en la carga y en el transporte disminuye, ya que la operación de carga se realiza más fácilmente y el llenado de las cajas de los volquetes es mejor. En la trituración y en la molienda el consumo de energía también descenderá al disminuir la granulometría del material de alimentación.

Tal y como se deduce del esquema metodológico a seguir en el procedimiento de optimización, Fig. 6.13, el menor coste unitario total no se corresponde con el menor coste en explosivo por tonelada, pues la fragmentación se ve seriamente afectada de manera negativa.

Con carácter general, se puede afirmar que se suele escatimar en el consumo de explosivo, provocando sobrecostes en el resto de operaciones y, lo que es más grave, la aparición de los denominados bolos o bloques de roca difícilmente manipulables por los equipos de carga y no admitidos por las aberturas de las machacadoras. Como se verá más adelante, el proceso de conminución más rentable -reducción de tamaños- es el que se suele realizar en origen, en este caso con-

sumiendo la energía química del explosivo en lugar de la energía eléctrica en las trituradoras y molinos. No hay que olvidar que, además de los consumos energéticos, se producen desgastes de los materiales que componen los equipos y que constituyen partidas muy significativas.

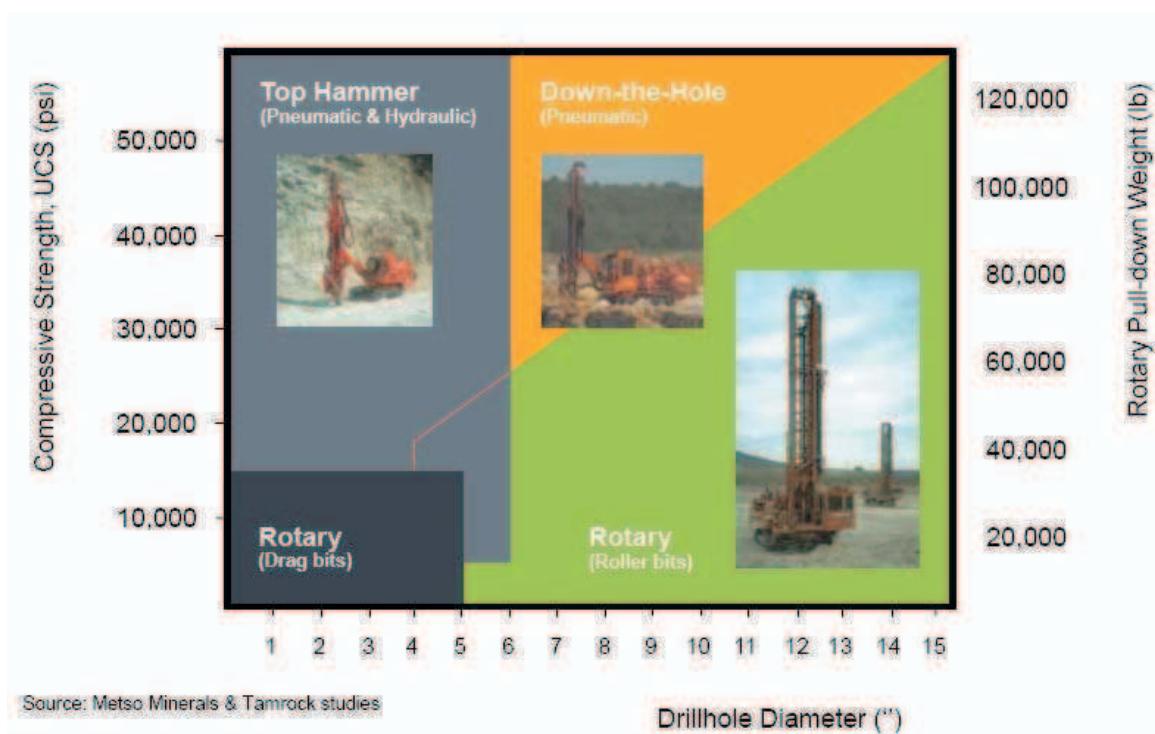


**Foto 6.1.** La fragmentación resultante tras la voladura repercute directamente en el coste total de producción y en la energía consumida  
(Fuente: Metso Minerals y Tamrock studies; 2006).

### 6.3.1.1. Perforación

Los sistemas de perforación se dividen en rotopercutivos y a rotación y su elección depende de las características de la roca y de la producción necesaria y, por tanto, de su diámetro.

El primer sistema, el rotopercutivo, es el más utilizado en la explotación de canteras, pudiendo ser de martillo en cabeza, martillo en fondo y sistema Coprod.



**Figura 6.14.** Campos de aplicación de los diferentes tipos de perforadoras (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).



**Foto 6.2.** Perforadora con martillo en cabeza (Fuente: Sandvik).

En la tabla adjunta, se comparan los tres sistemas.

**Tabla 6.2.** Comparativa de los sistemas de perforación rotopercusivos.

MÉTODO	MARTILLO EN CABEZA	MARTILLO EN FONDO	COPROD
Diámetro, mm	76-140	90-200	105-180
Velocidad penetración	2*	1	3
Exactitud barreno	1	3	2
Longitud perforación	1	3	2
Producción t/h	2	1	3
Gas oil l/t	2	1	3
Duración varillaje	1	3	2
Coste varillaje	2	3	1
Buenas condiciones de perforación	3	3	3
Malas condiciones de perforación	1	3	3
Fácil operación	2	3	1
Barrido	1	2	3

\* 1: Regular; 2: Bien; 3: Muy bien

El diámetro de perforación se determina en función de la producción necesaria y el tipo de roca.

**Tabla 6.3.** Relación entre el diámetro de perforación y la producción de granito y caliza.

	DIÁMETRO ( mm)						
	76	89	102	127	140	152	165
Granito (t/h)	945,95	1.081,33	1.373,58	1.552,08	2.133,08		
Caliza (t/h)	1.227,10	1.412,98	1.837,90	2.107,34	2.666,02	2.853,74	3.153,07

Un aumento del diámetro de perforación tiene las siguientes ventajas:

- ✿ Aumento de la producción.
- ✿ Disminución de los costes de perforación y voladura.

Pero hay que tener en cuenta que también tiene las siguientes desventajas:

- ✿ Aumento de la granulometría. El coeficiente K50<sup>4</sup> aumenta, lo que significa una disminución de los rendimientos de carga, transporte y machaqueo, para unos equipos dados, o la necesidad de aumentar el tamaño de cazo, peso del volquete y tamaño de la machacadora primaria para mantener la producción y, por lo tanto, mayor coste de inversión y de operación.
- ✿ Aumento del porcentaje de bolos producido y, consiguientemente, aumento del coste de taqueo y posibles disminuciones de rendimiento por atasco o eliminación de los mismos.
- ✿ Aumento del porcentaje de finos producido <0,06 mm, que en ciertas ocasiones pueden ser considerados como estériles y deben ser separados.



**Foto 6.3.** Problemas producidos por bolos en la alimentación de la machacadora  
(Fuente: Metso Minerals).

<sup>4</sup> K50: indica el porcentaje de paso. Así, K50= 250 mm significa que el 50% de la distribución de la voladura pasa 250 mm.

Desde el punto de vista de eficiencia energética, se deben emplear los sistemas de martillo en cabeza, convencional en el rango 76 mm-127 mm en roca dura y compacta, y el sistema Coprod en el rango 140-165 mm e incluso inferiores en el caso de rocas muy fisuradas y alteradas.

En la Tabla 6.4 se expone el índice de consumo de gasoil.

**Tabla 6.4.** Relación entre el diámetro de perforación y el consumo de gasoil para granito y caliza.

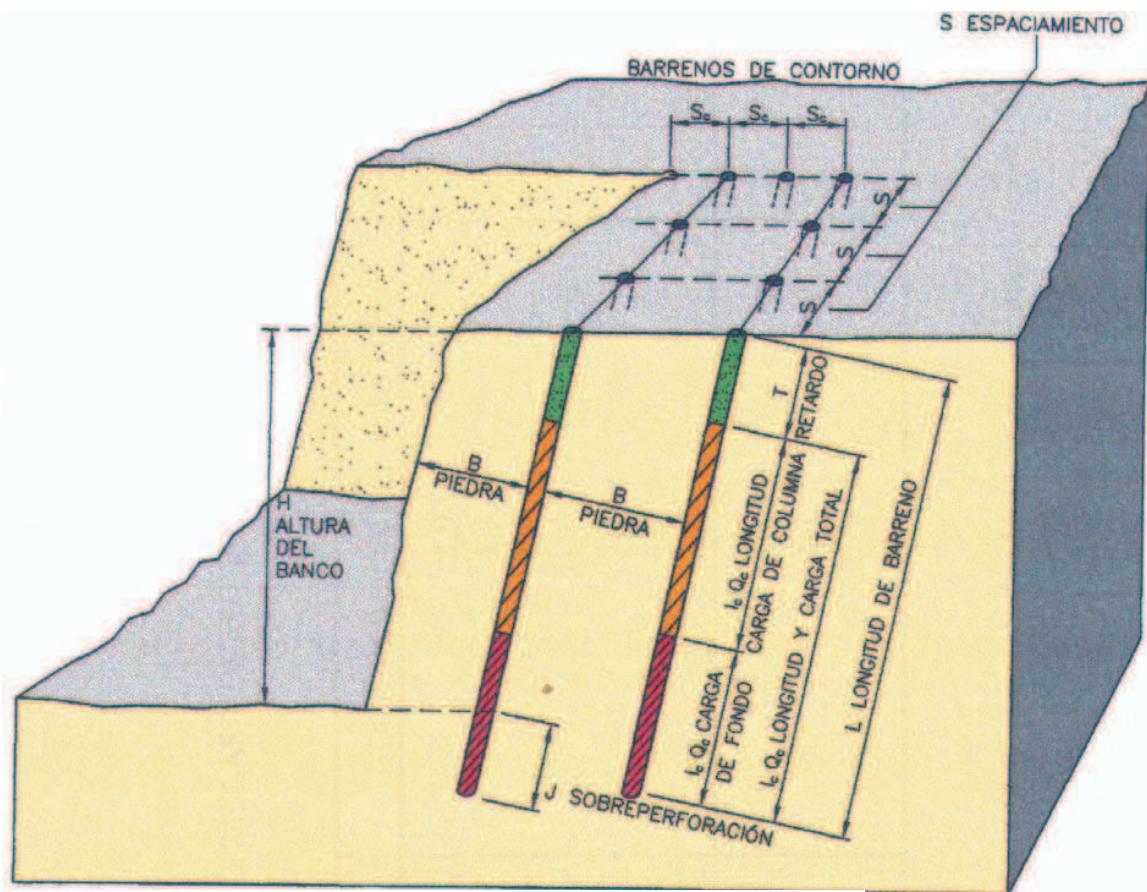
	DIÁMETRO ( mm)						
	76	89	102	127	140	152	165
<b>Granito (l/t)</b>	0,028	0,024	0,024	0,024	0,022		
<b>Caliza (l/t)</b>	0,022	0,019	0,018	0,017	0,017	0,016	0,015

Un punto importante a tener en cuenta durante la operación es el control de la perforación:

- ✿ Errores en el replanteo de barrenos. Deben ser marcados por el departamento de topografía con pintura en el terreno.
- ✿ Errores en la inclinación y dirección de los barrenos. Utilización de sistemas de posicionamiento automático en los carros de perforación.
- ✿ Problemas de desvío de barrenos. Utilización de una sarta de varillaje rígida, tubos en lugar de barras, bocas especiales retráctiles, en función del tipo de terreno y del diámetro de perforación.
- ✿ Problemas en la cota de perforación. Utilización de GPS.

### 6.3.1.2. Voladura

Mediante la voladura se produce una fragmentación y un esponjamiento de la roca que permite su manipulación posterior: carga, transporte y proceso en la planta de trituración y clasificación.



**Figura 6.15.** Sección tipo de la carga de un barreno

(Fuente: ALBA Ingenieros Consultores, S.L.).

Las variables geométricas de una voladura son:

- Diámetro D, depende del tipo de roca, altura de banco y producción requerida.
- Altura de banco H, se debe conseguir una relación  $H/B=3$  y unas condiciones de seguridad adecuadas; normalmente oscila entre 10 y 15 metros.
- Sobreperforación, perforación por debajo del piso 0,2-0,5B.
- Piedra B, 36-39D, en función del tipo de roca, dura y blanda.
- Espaciamiento S, 46-50D, en función del tipo de roca.
- Retacado T, 30-35D, en función del tipo de roca.

En la tabla siguiente se dan los esquemas de perforación, la distribución de carga y el diámetro de perforación en función del tipo de roca, para una altura de banco de 12 m.

**Tabla 6.5.** Esquema de perforación.

	DIÁMETRO ( mm)													
	76	89	102	112	127	140	76	89	102	112	127	140	152	165
	GRANITO						CALIZA							
B (m)	2,74	3,2	3,67	4,03	4,57	5,04	2,96	3,47	3,98	4,37	4,95	5,46	5,93	6,44
S (m)	3,5	4,09	4,69	5,15	5,84	6,44	3,8	4,45	5,1	5,6	6,35	7	7,6	8,25
Volumen (m <sup>3</sup> )	114,8	157,4	206,8	249,3	320,5	389,5	135,2	185,4	243,5	293,5	377,4	458,6	540,6	637,1
Rendimiento (m <sup>3</sup> /m)	8,63	11,75	15,2	18,2	23,31	28,33	10,48	14,26	18,58	22,24	28,81	32,53	38,34	45,18
Carga Fondo qf (kg)	10	10	10	12,6	15	15	10	10	10	12,6	15	15	15	15
Carga Columna qc (kg)	30,84	44,65	61,48	74,34	93,71	119,6	29,47	42,43	58,16	69,93	87,59	112	117,2	133,7
Retacado T (m)	2,28	2,67	3,06	3,36	3,81	4,2	2,66	3,12	3,57	3,92	4,45	4,9	5,32	5,78
Carga Barreno qb (kg)	40,84	54,65	71,48	86,94	108,7	134,6	39,47	52,43	68,16	82,53	102,6	127	132,2	148,7
Carga Específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,35	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,24	0,23
Carga Específica Fondo (kg/m <sup>3</sup> )	0,09	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
Carga Específica Columna (kg/m <sup>3</sup> )	0,27	0,28	0,3	0,3	0,29	0,31	0,22	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,22	0,21

Se emplean cargas selectivas con cargas de fondo con explosivos de alta densidad y energía como dinamitas, emulsiones o hidrogeles, y explosivos con menor densidad y energía como el anfo o heavy anfo o cartuchos desacoplados en caso de presencia de agua.

Según los resultados del modelo de optimización de los costes de producción a partir de la fragmentación de la roca, Fig. 6.13, para conseguir una menor fragmentación, y por tanto mayor eficacia, se precisa un mayor consumo de energía con esquemas más cerrados, disminuyendo el rendimiento de perforación (m<sup>3</sup>/m). El consumo de energía aumenta debido al aumento de la carga específica (kg/m<sup>3</sup>) y al empleo de explosivos más potentes.

Además, hay que tratar de conseguir un K50 óptimo, que puede estimarse a partir de las voladuras o mediante el modelo Kuz-Ram, que establece el K50 según los siguientes parámetros:

- ✿ Tipo de roca.
- ✿ Carga específica kg/m<sup>3</sup>.
- ✿ Carga por barreno.
- ✿ B, S/B, longitud de carga y longitudes de la carga de fondo y de columna.

Hay que tener en cuenta también el porcentaje de bolos que se producen en la voladura. Se denomina bolo, a aquel tamaño de bloque que no es admitido por la machacadora primaria, determinado dicho tamaño por 0.8 A, siendo A la admisión de la machacadora.

La fragmentación secundaria o taqueo de los bolos es una operación costosa, pudiéndose utilizar la técnica de perforación y voladura con pequeñas cargas de explosivo, siendo lo normal el empleo de martillos hidráulicos montados sobre retros o en la tolva de la machacadora.

Considerando un martillo de 2.500 kg de peso, que precisa una retro de 30 t, y considerando un 7% de bolos en granito y un 5% en caliza, se tienen los siguientes consumos específicos:

- ✿ Granito: 0,021 l/t.
- ✿ Caliza: 0,010 l/t.

Este porcentaje de bolos depende del coeficiente K50 y el ratio  $fcl$ : longitud de carga útil/altura de banco. Se denomina carga útil la que se encuentra por encima de la rasante.



**Foto 6.4.** Bolos resultantes en una voladura en cantera (Fuente: Metso Minerals y Tamrock studies; 2006).

Para visualizar mejor el procedimiento de optimización de costes unitarios se ha tomado como base un estudio efectuado por Eloranta (2006). En este trabajo se realiza una simulación en una cantera de áridos de machaqueo para cinco escenarios de perforación diferentes, obteniendo cinco granulometrías. La explotación además cuenta con una planta de tratamiento de 1.600 t/h de producción, en la que se obtienen productos finales de 0 a 20 mm.

La cantera estudiada se explota en bancos de 10 metros de altura usando un diámetro de perforación de 89 mm que es el más aconsejable, tanto por el tipo de roca como por las características de la operación.

**Tabla 6.6.** Casos analizados por Eloranta (2006)

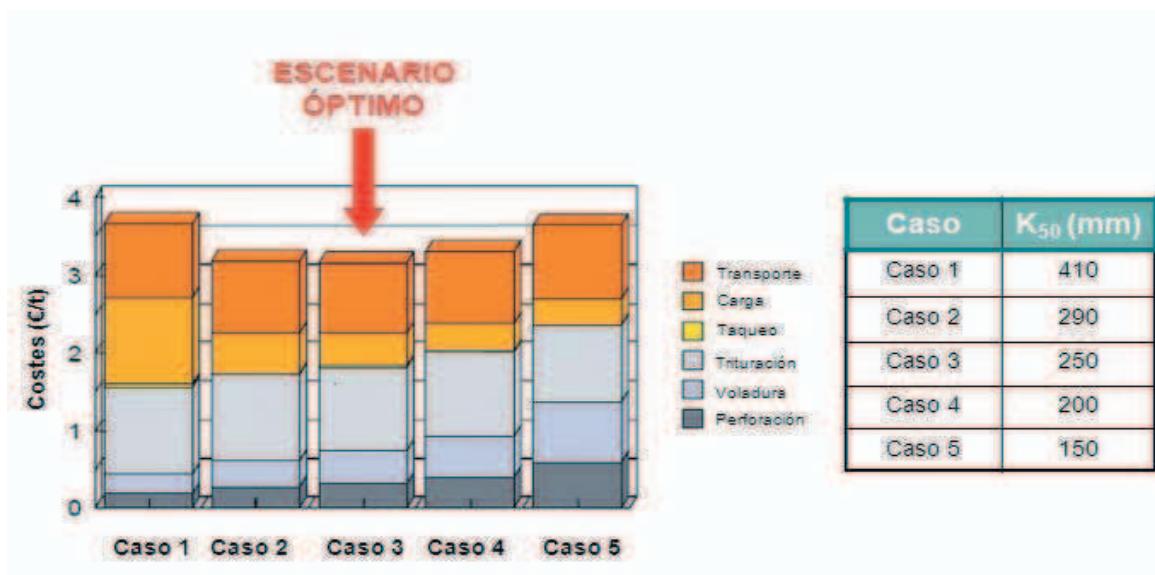
DATOS PRINCIPALES	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
<b>Perforación</b>					
Nº de unidades	3	4	5	6	8
Malla B*S (m <sup>2</sup> )	9	6,4	5,8	4,5	3,3
<b>Voladura</b>					
Consumo específico (kg/m <sup>3</sup> )	0,53	0,76	0,9	1,15	1,56
K50 (mm)	410	290	250	200	150
<b>Nº de operadores</b>			18-22		
<b>Excavadoras</b>			12		
Capacidad de cazo (m <sup>3</sup> )			2-7 dependiendo de las configuraciones de la voladura o cazo (o cazo)		
Nº de unidades					
<b>Volquetes</b>					
Capacidad (t)			50		
Distancia (km)			2		
Nº de unidades			8-10 dependiendo de la configuración de la voladura		
<b>Trituración</b>					
Tipo			Trituradora Nordberg C160		
Nº de unidades primarias			2		
Nº de unidades sec. y terc.			5		
<b>General</b>					
Perforabilidad y Volubilidad			45/0,7		
Índice de Bond (kWh/t)			15		
Diámetro de perforación			89		
Altura de banco (m)			10		
Explosivo			Anfo		
Tasa de interés (%) / Unidades cantera			10 / 20		
Precio gasóleo (€/l) / Energía(€/kWh)			0,5 / 0,1		
Mano de obra (€/h)			17		

(FUENTE: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010)

A partir de estos datos se han determinado los costes unitarios de operación de la cantera.

Los costes totales por tonelada producida para los cinco casos estudiados se exponen gráficamente en la Fig. 6.16, donde se indica que el escenario óptimo se obtiene en el Caso 3, con una granulometría de paso de 250 mm.

Del estudio se establecen las siguientes conclusiones:



**Figura 6.16.** Costes totales unitarios de producción para los cinco caso estudiados por Eloranta (2006) (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

- ✿ La fragmentación óptima se produce para un K<sub>50</sub> comprendido entre 250-300 mm.
- ✿ Los costes de trituración son independientes de K<sub>50</sub> porque sólo afecta a la trituración primaria y no a la secundaria y terciaria, ni al cribado del material.
- ✿ El empleo de diámetros de perforación pequeños, menores de 89 mm, puede resultar económicamente aconsejable debido a los siguientes factores:
  - Hay menor producción de bolos.
  - Hay menor cantidad de finos < 0,6 mm, que pueden resultar estériles, perdiéndose en los lodos.
  - Hay menores vibraciones y onda aérea producidas, lo que es importante en el caso de que la explotación se encuentre próxima a núcleos habitados.
  - La eliminación o reducción de la manipulación y fragmentación de los bolos es importante.

Las mejoras en la optimización de las voladuras son, por lo tanto:

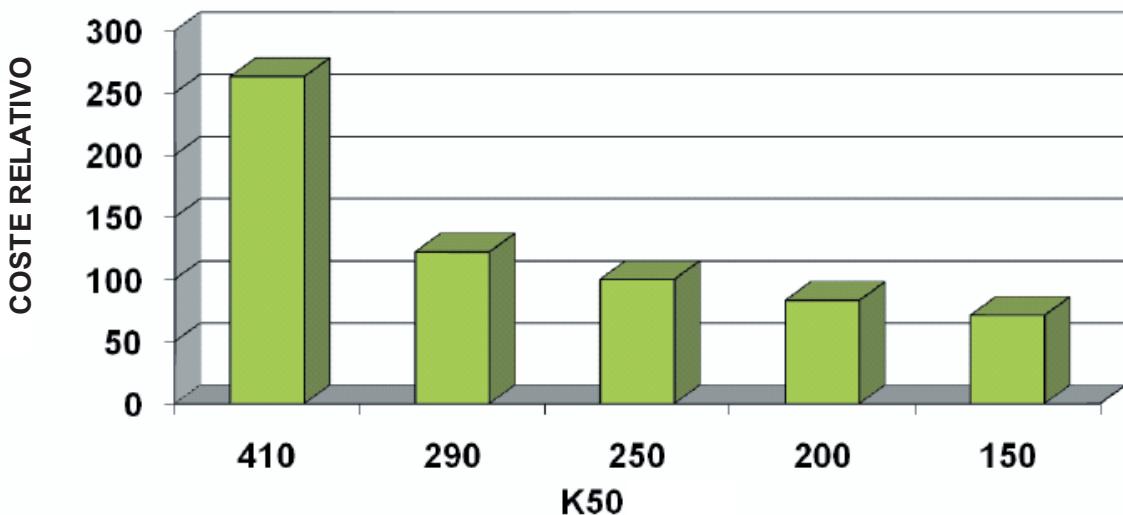
- ✿ El empleo del diámetro más pequeño que proporcione la producción necesaria.
- ✿ El uso del Anfo como carga de columna, porque proporciona el coste €/kWh más bajo, siendo necesario el desagüe de los barrenos cuando exista la presencia de agua.
- ✿ La utilización de tapones en el retacado y el empleo de material granular de cantera de tamaño 1/17D. Esto permite una disminución del retacado de 6D, manteniendo el grado de confinamiento necesario, observándose las siguientes ventajas.
  - Aumento de la carga por barreno.
  - Aumento del ratio de carga  $f_{cl}$ .
  - Disminución del K50.
  - Fuerte disminución del porcentaje de bolos.

### 6.3.1.3. Carga

Como se ha visto anteriormente, la fragmentación de la roca volada tiene también una incidencia directa en los rendimientos de los equipos de carga y, consecuentemente, en los costes unitarios de esta operación, tal y como se señala en la Fig. 6.17.

La carga del material, que se realiza después del arranque con perforación y voladura en el caso de canteras o como primera operación si se trata de graveras, se puede realizar sobre los siguientes puntos:

- ✿ Volquetes que trasladan el material a la planta de machaqueo fija o semimóvil.
- ✿ Trolva de una planta móvil de machaqueo.
- ✿ Trolva de una criba móvil.



**Figura 6.17.** Costes relativos unitarios de la operación de carga en función de la granulometría (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

En los dos primeros casos se trata de material arrancado con perforación y voladura, y en el tercero se trataría de una grava.

Las máquinas que realizan la carga del escombro son las excavadoras hidráulicas y las palas de ruedas.

Las **excavadoras hidráulicas** presentan dos configuraciones: frontales y retro. La diferencia de diseño se centra en el sentido de movimiento del cazo y en la geometría de los equipos de trabajo.



Las características más importantes de las excavadoras hidráulicas son:

- Peso reducido en relación a la capacidad del cazo.
- Capacidad para trabajar en pendientes de hasta el 60%.
- Fuerzas de penetración y excavación elevada, consiguiendo un buen llenado del cazo.
- Control de descarga, por lo que es idónea tanto para la carga de camiones como en la alimentación de plantas móviles de machaqueo y trituración.
- No precisan el empleo de máquinas auxiliares.
- Consumo de energía moderado.

**Figura 6.18.** Características de las excavadoras hidráulicas  
(Fuente: Liebherr Ibérica).

En la Tabla 6.7 se determina el tamaño del cazo de la excavadora y su peso en función del tipo de roca y de la producción necesaria.

**Tabla 6.7.** Características de las excavadoras hidráulicas en función de la producción y el tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	PRODUCCIÓN (t/h)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
2,60	44,2	310	401	471
3,00	51,0	351	450	524
4,20	71,4	471	591	675
4,90	83,3	539	670	757
6,50	110,5	689	842	936
7,50	127,5	780	945	1.042
11,00	187,0	1.088	1.289	1.389
13,00	221,0	1.259	1.476	1.575

Asimismo, en la Tabla 6.8 se determina la capacidad del camión necesario en función del peso de la máquina de carga y del tipo de material.

**Tabla 6.8.** Peso de los camiones según tamaño de las excavadoras y el tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	PESO VOLQUETE (t)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
2,60	44,2	24	27	28
3,00	51,0	28	31	32
4,20	71,4	39	43	45
4,90	83,3	45	50	53
6,50	110,5	60	67	70
7,50	127,5	69	77	81
11,00	187,0	101	113	119
13,00	221,0	120	134	140

La potencia de la máquina se determina en función del tamaño de cazo:

$$P \text{ (kW)} = 59 \times C \text{ (m}^3\text{)}.$$

Para asegurar un buen rendimiento de carga, la granulometría del material volado debe ser como máximo 1/8 del tamaño del cazo. Con las granulometrías

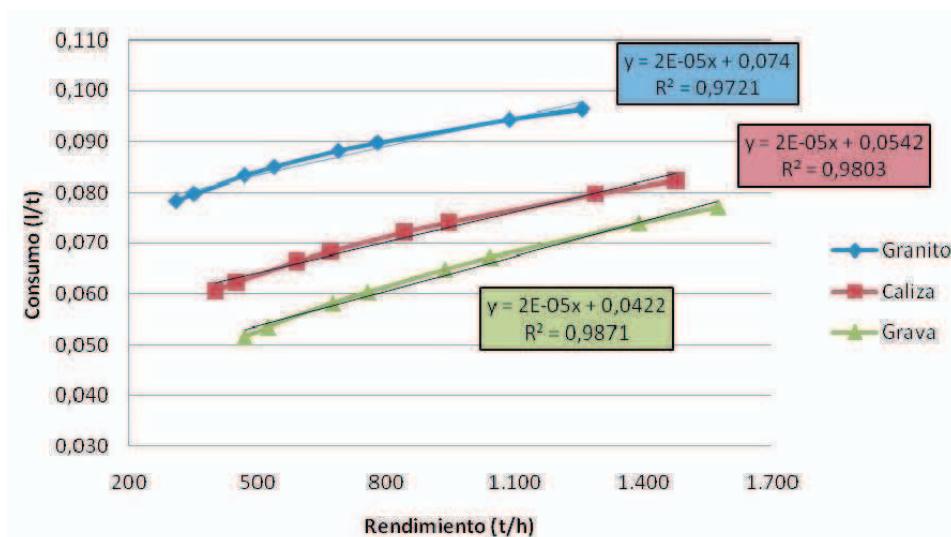
más finas se consigue un mayor llenado del cazo en un tiempo menor. En el caso contrario la operación se dificulta, alargándose además los tiempos de ciclo.

El consumo de gasoil también es función del tamaño de máquina y tipo de material.

**Tabla 6.9.** Consumo de combustible según capacidad de cazo y tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	CONSUMO (l/t)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
2,60	44,2	0,078	0,061	0,052
3,00	51,0	0,080	0,062	0,053
4,20	71,4	0,083	0,066	0,058
4,90	83,3	0,085	0,068	0,060
6,50	110,5	0,088	0,072	0,065
7,50	127,5	0,090	0,074	0,067
11,00	187,0	0,094	0,080	0,074
13,00	221,0	0,097	0,082	0,077

En la Fig. 6.19 se proporciona un gráfico en el que se relaciona el consumo específico de gasoil, para granito, caliza y grava, con las producciones horarias de las excavadoras, su peso y tamaño de cazo, expresadas en la Tabla 6.7.



**Figura 6.19.** Consumo específico de gasoil en función del tipo de material y el rendimiento.



Las características más importantes son:

- Gran movilidad.
- Excelente maniobrabilidad.
- Facilidad para mantener un frente de carga limpio.
- Posibilidad de trabajar en pendiente.

**Figura 6.20.** Características de las palas de ruedas (Fuente: Caterpillar).

Las **palas de ruedas** desarrollan las siguientes operaciones:

- ✿ Carga de camiones y tolvas.
- ✿ Carga y transporte, eliminando el empleo de camiones para pequeñas distancias.
  - Desde el frente a la planta móvil de machaqueo o cribado.
  - Desde los acopios de material a las plantas de tratamiento.
- ✿ Como máquina auxiliar en la explotación.

En la Tabla 6.10 se determina el tamaño del cazo de la pala y su peso en función del tipo de roca y de la producción necesaria.

**Tabla 6.10.** Características de las palas de ruedas en función de la producción y el tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	PRODUCCIÓN (t/h)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
5,00	37,50	317	411	432
6,00	45,00	360	474	501
9,00	67,50	476	654	695
11,00	82,50	547	766	818
16,00	120,00	708	1.030	1.108
19,00	142,50	797	1.179	1.274
30,00	225,00	1.093	1.692	1.844

Al igual que con la excavadoras, en la Tabla 6.11 se determina la capacidad del camión en función del peso de la máquina y del tipo de material.

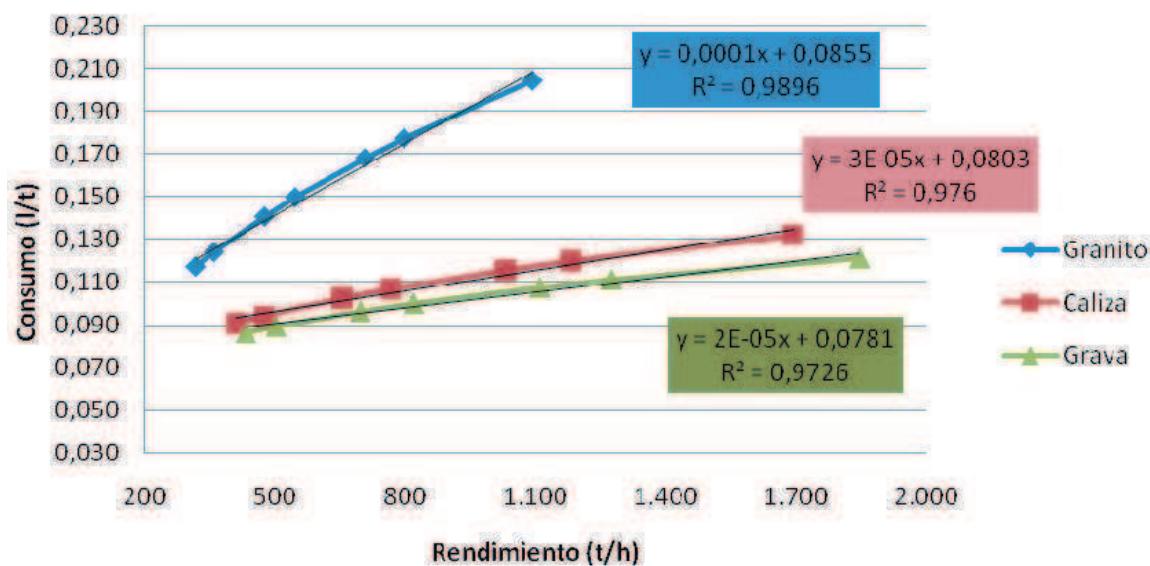
**Tabla 6.11.** Peso de los camiones según tamaño de las excavadoras y el tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	PESO VOLQUETE (t)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
5,00	37,50	46	51	54
6,00	45,00	55	62	65
9,00	67,50	83	93	97
11,00	82,50	101	113	119
16,00	120,00	148	165	172
19,00	142,50	175	196	205
30,00	225,00	277	309	323

El consumo de gasoil en función de la producción y tipo de material se expone en la Tabla 6.12 y en la Fig. 6.21, siguientes.

**Tabla 6.12.** Consumo de combustible según capacidad de cazo y tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	CONSUMO (l/t)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA
5,00	37,50	0,117	0,091	0,086
6,00	45,00	0,124	0,094	0,089
9,00	67,50	0,141	0,103	0,096
11,00	82,50	0,150	0,107	0,100
16,00	120,00	0,168	0,116	0,107
19,00	142,50	0,177	0,120	0,111
30,00	225,00	0,204	0,132	0,121



**Figura 6.21.** Consumo específico de gasoil en función del tipo de material y el rendimiento.

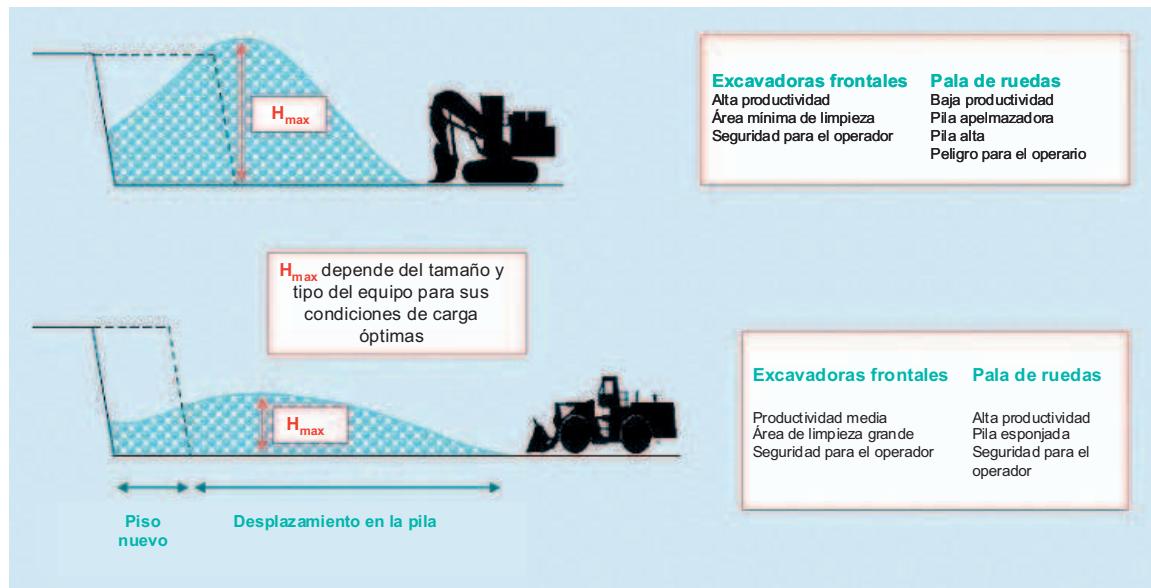
Además de la granulometría, en las operaciones de carga influye la geometría de la pila de escombro, Fig. 6.22. En general, cuando se utilizan excavadoras hidráulicas es recomendable que las pilas queden altas y recogidas con el fin de conseguir la máxima productividad. En el caso de las palas de ruedas por el contrario, se aconsejan que las pilas queden más extendidas y esponjadas de manera que la carga resulte más fácil.

Con este análisis comparativo se concluye que el sistema de carga más eficiente es el de la excavadora hidráulica, debiendo desechar la pala de ruedas que además demanda un camión de mayor capacidad para la misma producción y, por lo tanto, de una mayor inversión.

Asimismo, es muy ineficiente acopiar el todo uno de cantera en la explanada de la machacadora primaria, taquear con excavadora y martillo, y alimentar la planta con pala de ruedas.

Otro sistema ineficiente es el de tener los acopios al aire libre y cargar con pala de ruedas los productos finales de venta. Se deben tener tolvas y cargar directamente sobre los camiones. En la Tabla 6.13 y en la Fig. 6.23 se muestran el rendimiento y los consumos de gasoil en manipulación para los distintos tipos de roca

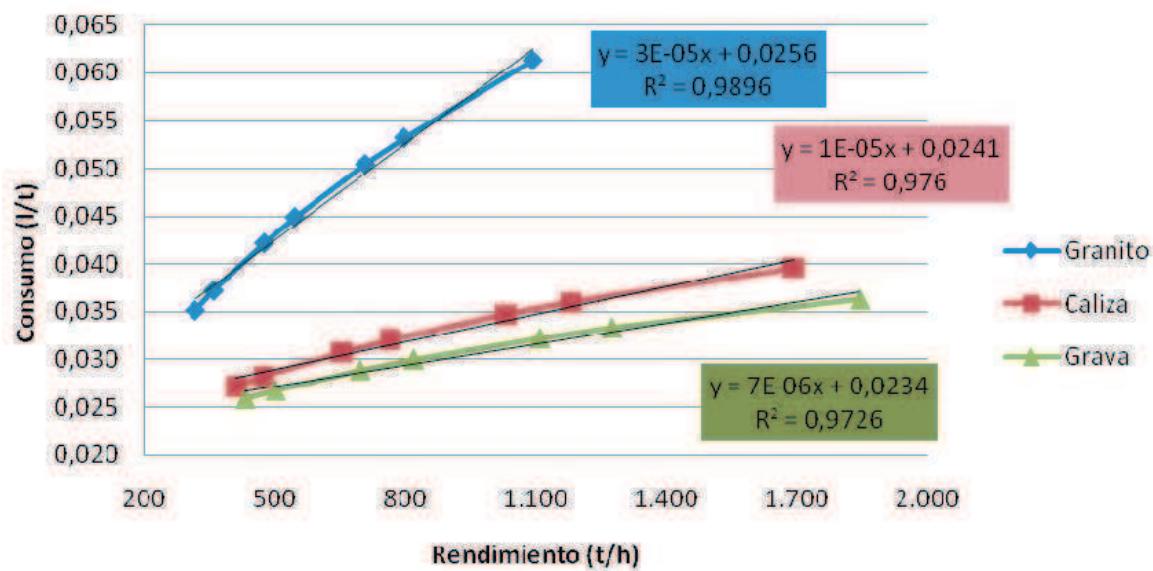
analizados, suponiendo esta última alternativa, con una carga del 30 % por efecto.



**Figura 6.22.** Influencia de la geometría de la pila de material en la operación de carga (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

**Tabla 6.13.** Producción y consumo de combustible según capacidad de cazo y tipo de roca a cargar.

CAZO (m <sup>3</sup> )	PESO (t)	PRODUCCIÓN (t/h)			CONSUMO (l/t)		
		GRANITO	CALIZA	GRAVA	GRANITO	CALIZA	GRAVA
5,00	37,50	317	411	432	0,035	0,027	0,026
6,00	45,00	360	474	501	0,037	0,028	0,027
9,00	67,50	476	654	695	0,042	0,031	0,029
11,00	82,50	547	766	818	0,045	0,032	0,030
16,00	120,00	708	1.030	1.108	0,050	0,035	0,032
19,00	142,50	797	1.179	1.274	0,053	0,036	0,033
30,00	225,00	1.093	1.692	1.844	0,061	0,040	0,036



**Figura 6.23.** Consumo específico de gasoil durante la carga con pala.

En la Tabla 6.14 también se comparan las alternativas de excavadoras hidráulicas y palas de ruedas para alimentar a plantas móviles de machaqueo.

**Tabla 6.14.** Producción y consumo de combustible según capacidad de cazo y tipo de roca a cargar.

PROPIEDADES	EXCAVADORA		PALA RUEDAS
	RETRO	FRONTAL	
CONTROL TAMAÑO ROCA	Muy bueno	Bueno	Malo
FORMA ALIMENTACIÓN	Muy bueno	Muy bueno	Malo
TAMAÑO vs PRODUCCIÓN	El tamaño se selecciona en función de la producción	Se necesita mayor tamaño para el mismo alcance	El tamaño depende de la producción y de la distancia de transporte
FUERZA DE ARRANQUE	Muy buena	Muy buena	Regular
ALCANCE	5-10 m	5-10 m	50-100 m
INTERVALOS DE MOVIMIENTO DE PLANTA	2-4 h	2-4 h	1-2 semanas
COMENTARIOS GENERALES	Proporciona el menor coste por tonelada	Mayor coste que con retro	Posibilita la realización de mezclas en el frente

Por tanto, las recomendaciones para la optimización de la operación de carga son:

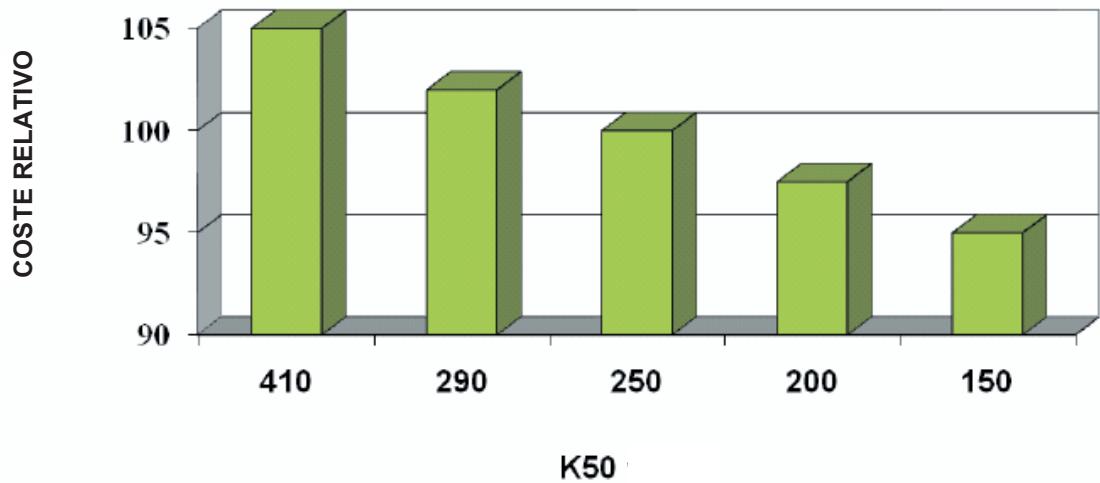
- La carga más eficiente es con excavadoras hidráulicas.
- Hay que minimizar la carga con palas, disponiendo de tolvas para los productos finales.

#### 6.3.1.4. Transporte

La influencia de la granulometría en la operación de transporte es análoga a la que tiene en la operación de carga, pues no hay que olvidar que en el tiempo total del ciclo de transporte se integra el tiempo correspondiente al ciclo de carga. Además, con las granulometrías más finas se consigue un mejor llenado de las cajas de los volquetes y una mejor distribución de las cargas, todo ello unido a unos menores costes de desgaste y reparaciones.



**Foto 6.5.** Ineficiencia en la operación de transporte debido a una carga excesiva  
(Fuente: Metso Minerals; 2006).



**Figura 6.24.** Evolución de los costes de transporte con la granulometría del material volado (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

### 6.3.1.5. Trituración y molienda

Finalmente, en el análisis de optimización del ciclo de producción a través de las voladuras, también se debe considerar la conminución. Es un proceso a través del cual se produce una reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración y/o molienda con el fin de:

- ✿ Liberar las especies diseminadas.
- ✿ Facilitar el manejo de los sólidos.
- ✿ Obtener un material de tamaño apropiado y controlado.

Otro efecto positivo sobre la trituración y molienda, menos conocido pero sí identificado por diversos autores (Eloranta, 1995; Paley y Kojovic, 2001; Workman Y Eloranta, 2003) es, además del debido a la distribución de tamaños de los fragmentos de las voladuras, el provocado por el debilitamiento interno o reblandecimiento de los fragmentos resultantes. El papel de las microfracturas es muy importante, especialmente en las últimas etapas de trituración y en la molienda. Generalmente se considera que los fragmentos se vuelven más duros o resistentes en cada etapa de conminución, debido a que la alimentación es menor y existen pocas fracturas geológicas o inducidas por las voladuras presentes en los fragmentos.

El grado en el que este efecto tiene lugar no está claro y depende de cada caso, pero se ha constatado que el *Índice de Trabajo de Bond* que expresa la resistencia de cada material a ser triturado y molido, experimenta una reducción con las voladuras más intensas.

Este índice depende fundamentalmente de la naturaleza de las rocas y minerales a triturar, siendo su significado físico el del trabajo necesario para reducir una tonelada desde un tamaño "infinito" hasta 100 micrómetros.

Al conocerse el tamaño medio de alimentación de la trituradora es posible calcular, a partir de la Tercera Teoría de Comminución o Ley de Bond (1952), el consumo de energía requerida para reducir el tamaño de los fragmentos desde un 80% de tamaño de alimentación hasta un 80% del tamaño de producto, uniforme y más pequeño.

$$W = 100 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

siendo:

$W$  = Energía necesaria (kWh) por tonelada tratada.

$W_i$  = Índice de Bond o Índice de Trabajo (kWh/t).

$P_{80}$  = Tamaño de la malla por el que pasa el 80% del producto (micrómetros).

$F_{80}$  = Tamaño de la malla por el que pasa el 80% de la alimentación (micrómetros).

**Figura 6.25.** Formulación de la Ley de Bond.

Una de las razones de utilizar la Tercera Teoría de Bond es que se han podido medir y registrar los Índices de Trabajo,  $W_i$ , de muchas rocas.

Según los resultados obtenidos al aplicar la expresión de Bond para determinar la energía consumida ( $W$ : kWh/t) y los costes de energía (€/t) por unidad de operación (voladura, trituración primaria, trituración secundaria y molienda), la molienda es la etapa del proceso donde se consume más energía y, por tanto, la de mayor coste energético, ya que el factor de reducción de la granulometría es varioscientos de veces superior al de las trituraciones anteriores, afectando muy significativamente al consumo total de energía y, por tanto, al coste final del proceso.

Esta operación es altamente ineficaz y el aprovechamiento de la energía gastada es muy bajo, siendo la mayor parte de la misma disipada en forma de calor (también ruido, deformaciones, energía cinética de las partículas, etc.).

Desde el punto de vista de la energía de conminución, está claro que la voladura que disminuye el índice de Bond podría producir importantes ahorros energéticos si esa reducción se lleva a cabo a través de la molienda.

La energía total consumida en el proceso puede variar por tres vías:

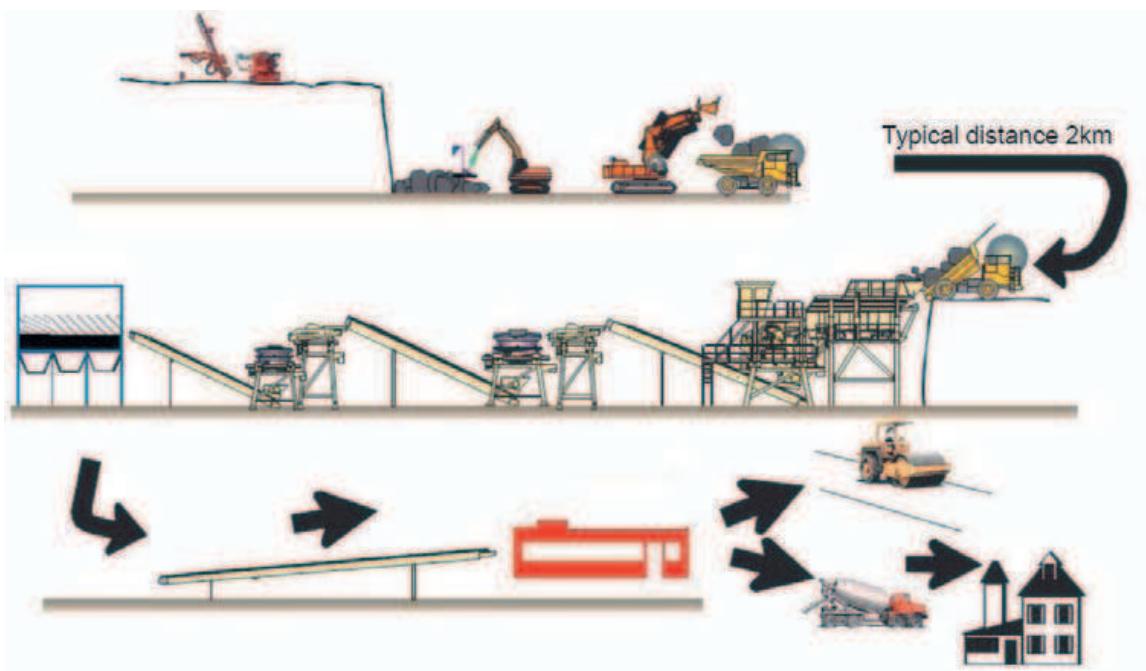
1. Si disminuye el tamaño de las partículas del todo uno procedentes de la voladura que alimenta la trituradora primaria.
2. Si decrece el  $W_i$  relacionado con el incremento de fracturas (macro y micro) de las partículas individuales a moler.
3. Si disminuye el porcentaje total de toneladas a triturar. Para ello, se podría incluso contemplar la posibilidad de instalar un precribador, de manera que sólo se trituraría la fracción más gruesa.

### 6.3.2. Optimización del sistema de explotación

Se entiende por **sistema de explotación** la combinación de equipos que llevan a cabo el ciclo de producción y que, normalmente, se caracterizan por el grado de continuidad que aportan al conjunto del sistema. Así, se pueden distinguir básicamente los siguientes casos:

- ✿ Sistema convencional discontinuo. Arranque con perforación y voladura, carga con palas o excavadoras, transporte con volquetes y trituración en plantas estacionarias o fijas.

En este caso, se considera que el material todo uno es transportado con volquetes hasta la planta de trituración estacionaria, situada a una distancia media de unos 2 km.



**Figura 6.26.** Sistema convencional discontinuo (Fuente: Metso Minerals, 2006).

- *Sistema intermedio.* Arranque con perforación y voladura, carga con palas o excavadoras, transporte con volquetes a distancias reducidas y trituración en plantas semimóviles que se trasladan cada cierto tiempo.

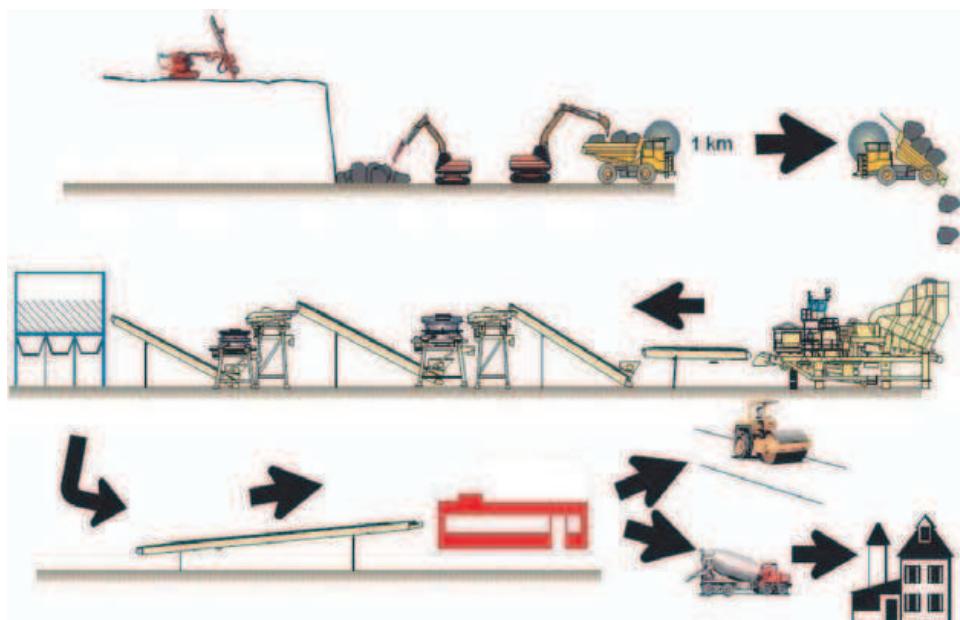
El todo uno es transportado, a menos de un kilómetro, desde el frente de cantera hasta la citada planta con volquetes y desde ésta, el producto obtenido con cintas hasta la planta de trituración secundaria y terciaria. Los cambios de emplazamiento de la planta semimóvil no son frecuentes y en cada ubicación se considera un tiempo habitual de más de un año.

- *Sistema continuo.* Arranque con perforación y voladura, carga con palas o excavadoras sobre trituradora móvil y transporte con cintas hasta la planta de tratamiento complementaria.

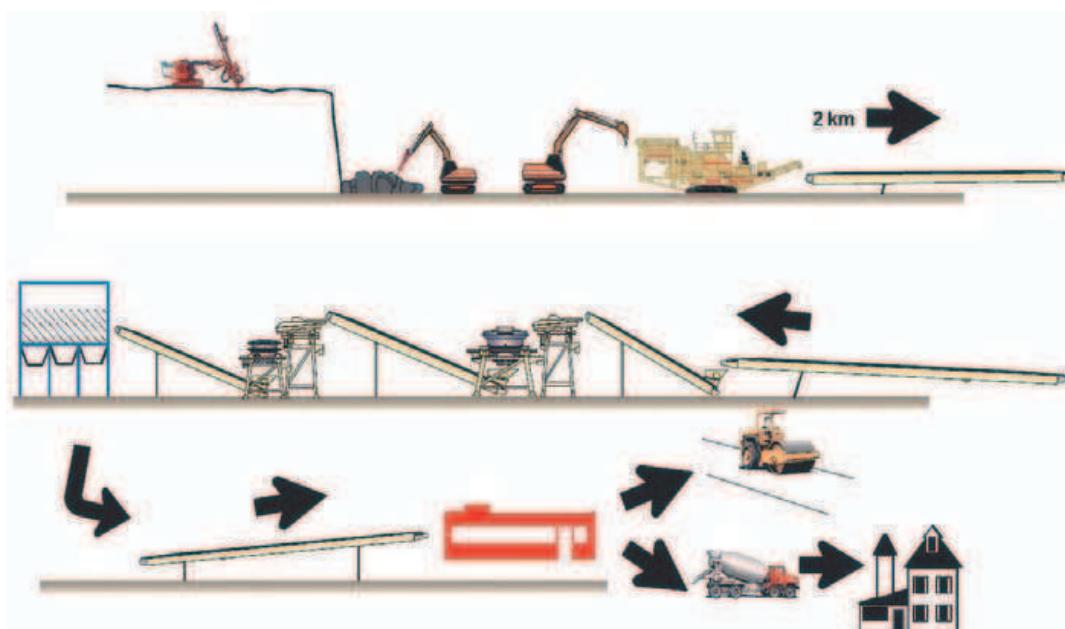
En este caso, la planta móvil va montada sobre un chasis de orugas y acompaña permanentemente al equipo de carga siguiendo el frente de trabajo. Para el transporte no se utilizan volquetes, pero sí cintas desde la trituradora móvil hasta la planta fija de trituración secundaria y terciaria.

La relocalización de las plantas móviles de trituración se lleva a cabo en tiempos que oscilan entre 5 y 10 minutos.

Para añadir más versatilidad y flexibilidad al sistema se suelen emplear cintas móviles modulares, es decir, de una determinada longitud, hasta la cinta fija o estacionaria principal.



**Figura 6.27.** Sistema intermedio (Fuente: Metso Minerals, 2006).

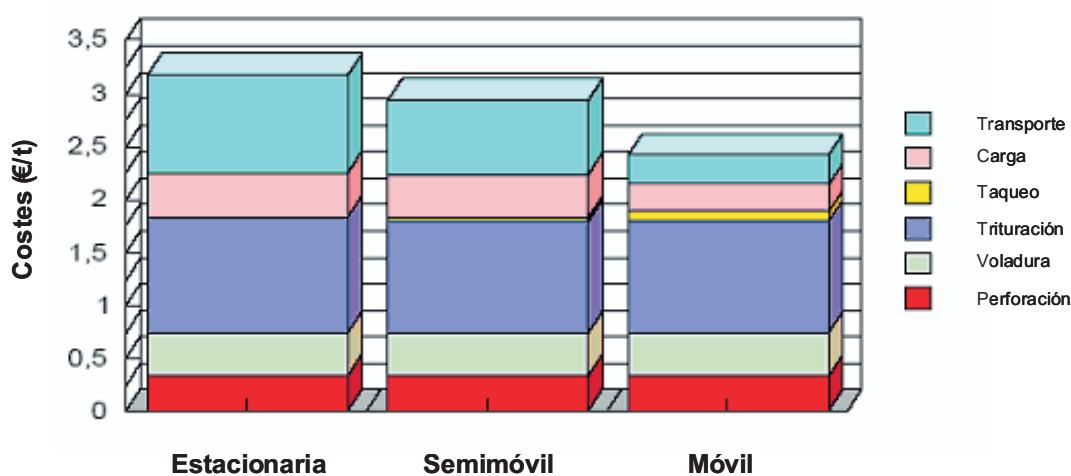


**Figura 6.28.** Sistema continuo (Fuente: Metso Minerals, 2006).



**Foto 6.6.** Cintas móviles modulares para el transporte desde una trituradora móvil  
 (Fuente: Metso Minerals, 2006).

El estudio comparativo de Eloranta (2006) sobre los costes unitarios del ciclo de producción de cada uno de los tres sistemas de explotación, Fig. 6.29, considerando una producción de 1.600 t/h y un producto final vendible de 0-20 mm, concluye que el sistema más económico, desde el punto de vista de costes totales de producción y energético, es el denominado continuo o con trituradora móvil, no sólo por reducir el consumo global sino por implicar una mayor electrificación.



**Figura 6.29.** Costes de producción unitarios para los tres sistemas de explotación  
 (Fuente: Metso Minerals, 2006).

En la gráfica se observa como los costes de perforación, voladura y trituración son similares en los tres sistemas, apareciendo una reducción de los costes de transporte conforme dicha operación se realiza, parcial o totalmente, con cintas. La reducción es más significativa en el caso del sistema continuo o con trituradora móvil, en el que se observa también una reducción de los costes de carga, pues los tiempos de ciclo disminuyen sobre todo cuando se realiza con retroexcavadoras. Por el contrario, aparece un incremento de los costes de taqueo para eliminar los sobretamaños que pudieran producir atascos en las tolvas de alimentación que disponen de una menor capacidad.

La diferencia total entre el sistema discontinuo con trituradora estacional o fija y el continuo con trituradora móvil es de aproximadamente un 25%.

En cualquier cantera, los costes de transporte representan un porcentaje del coste total unitario que oscila normalmente entre el 30% y el 60%. Con el fin de reducir ese coste operativo se pueden adoptar dos decisiones: emplear volquetes de mayor tonelaje o utilizar cintas transportadoras.

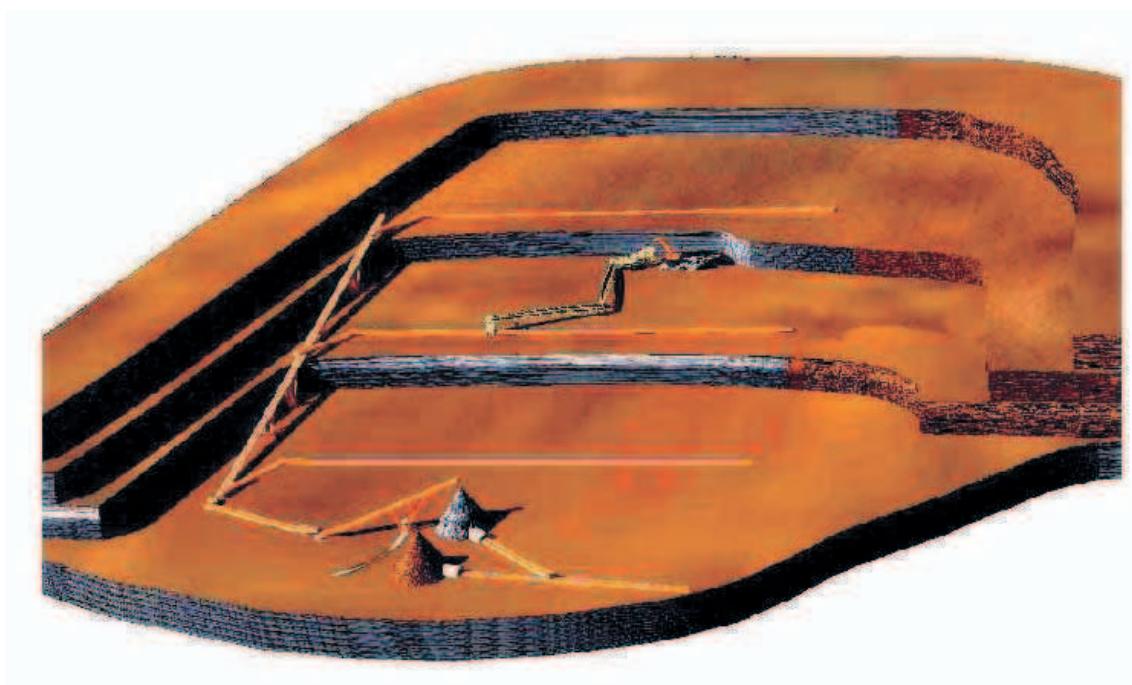
Si se opta por la primera decisión, se deben tener en cuenta los equipos de carga disponibles, las pistas de transporte y la capacidad de la tolva de descarga, así como las dimensiones de los talleres existentes. El beneficio de esta decisión es muy simple, pues se trata de producir lo mismo con una menor plantilla de personal.

Si se opta por la segunda decisión, se tendrán menores costes de transporte, siendo preciso contemplar la trituración primaria dentro del hueco de cantera, debido a que el todo uno volado se someterá a una reducción de tamaños hasta adecuarse a la granulometría máxima admitida por las cintas.

Desde un punto de vista estrictamente energético, los estudios comparativos realizados sobre los dos sistemas de transporte destacan que por cinta es del orden de 5 a 6 veces más eficiente, lo que al final se traduce en unos costes operativos de hasta tres veces menos.

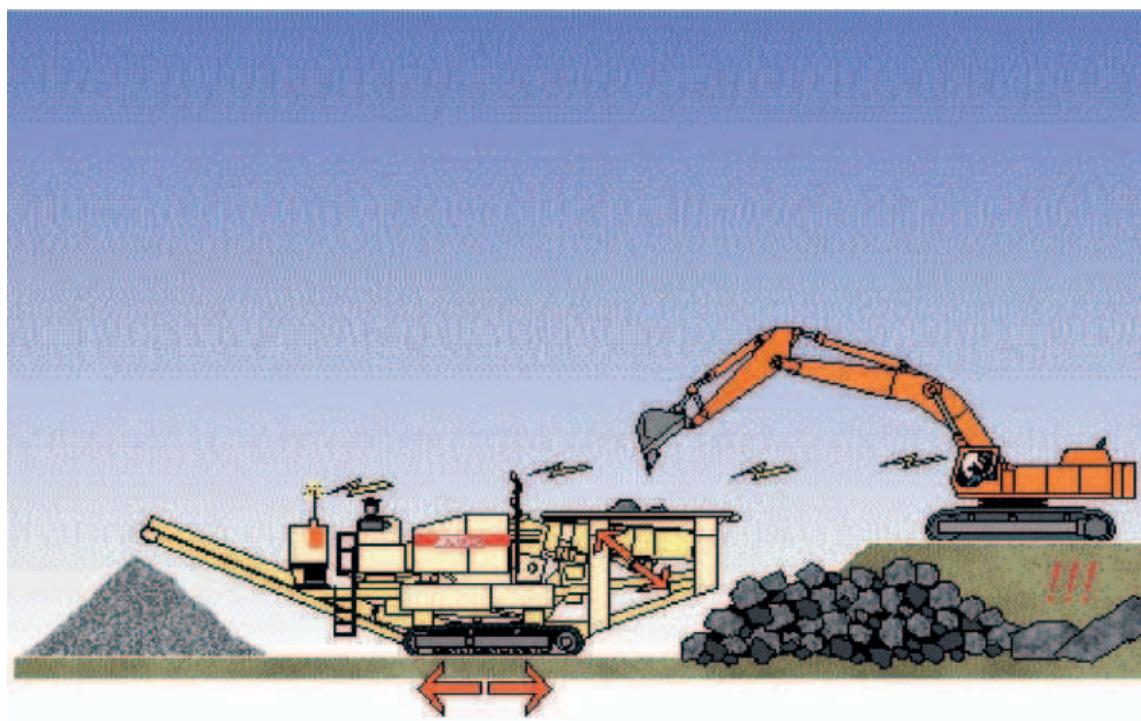
Por otra parte, también se debe considerar que el sistema de explotación continuo con trituradora móvil exige, normalmente, un mayor esfuerzo de planifica-

ción de las canteras. Si la cantera posee un solo banco de explotación la planificación resulta mucho más sencilla, pues la relocalización de los equipos tendrá lugar en función de los avances del tajo, apartando la trituradora móvil del frente exclusivamente cuando se vayan a disparar las voladuras. Pero, cuando las canteras se explotan en diferentes niveles, es preciso un mayor esfuerzo de ingeniería que permita reducir al máximo los desplazamientos de los equipos y, definir con precisión, la localización de las diferentes cintas –móviles, ripables, principal, etc.- y la necesidad de rampas auxiliares.



**Figura 6.30.** Explotación multibanco de una cantera (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

Las relocalizaciones de una planta móvil en un mismo banco a una distancia de 0,5 km requieren habitualmente de media hora, mientras que si se tiene que cambiar de banco o nivel de explotación se invertirán dos horas o más dependiendo de la distancia a la que debe ser desplazada. La velocidad de desplazamiento de una trituradora móvil suele ser de 1 km/h, siendo capaces de remontar pendientes de hasta 20º o del 35%.



**Foto 6.7.** Alimentación de una trituradora móvil mediante retroexcavadora  
(Fuente: Metso Minerals, 2006).

Para la alimentación de las trituradoras móviles, el equipo más adecuado es el constituido por las retroexcavadoras hidráulicas. El control de los sobretamaños y del ritmo de alimentación de la tolva es mayor, sobre todo teniendo en cuenta la posición de trabajo de estos equipos que es sobre la pila de material volado. La capacidad de producción es elevada al reducirse mucho el tiempo del ciclo de carga, debido a que el giro de la superestructura es pequeño si se compara con el de una excavadora frontal y, consecuentemente, el coste de carga por tonelada es el más bajo.

### 6.3.2.1. Transporte

Los sistemas utilizados para el transporte son los volquetes y, en el caso de empleo de plantas móviles y semimóviles de trituración, las cintas transportadoras.

#### VOLQUETES

Desde el punto de carga, a pie de cantera, el material se transporta a una planta fija o a una planta semimóvil mediante camiones tipo volquete.

Las ventajas de este sistema son:

- Flexibilidad en cuanto a la distancia de transporte, siendo aplicable entre 100 y 3.000 m.
- Capacidad de adaptación a todo tipo de materiales: rocas voladas, gravas, arenas etc.
- Facilidad para variar el ritmo de producción.
- Necesidad de una infraestructura, la pista, relativamente poco costosa, pero de una gran importancia.
- Posibilidad de contratar la operación.

Los inconvenientes son los siguientes:

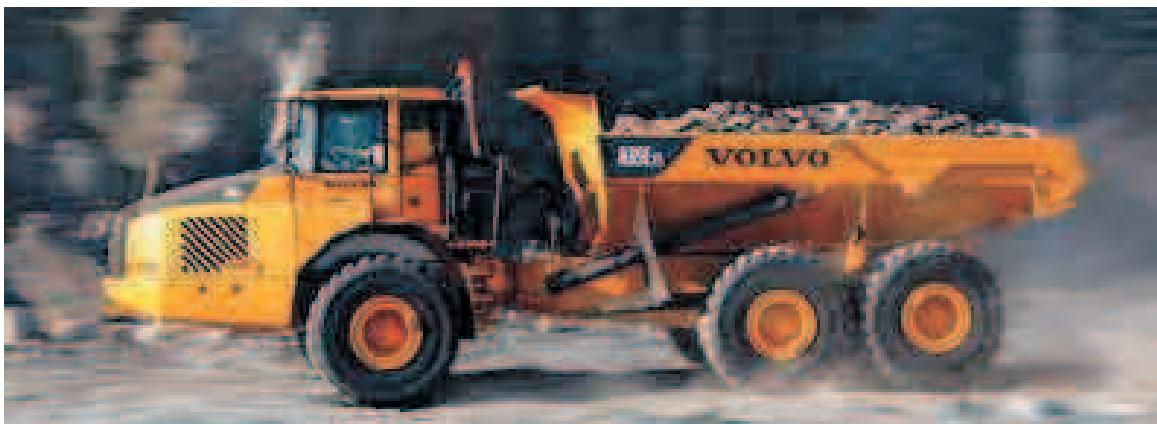
- Costes de operación elevados.
- Complicada supervisión y optimización cuando operan varias unidades, con distancias importantes entre los puntos de carga y descarga.
- Rendimientos bajos cuando aumenta la distancia de transporte y/o el desnivel a superar.
- Gran cantidad de mano de obra especializada en operación y mantenimiento.



Las características más importantes de los volquetes rígidos, que son los más utilizados en canteras, son:

- Relación entre la carga útil y el peso neto de 1.45 t/t.
- Potencia de 11 HP/t de capacidad de carga.
- Altura media de carga comprendida entre 3 y 5.5 m.
- Radio de giro mínimo de 1,1 a 1,2 la longitud total del volquete.
- Capacidad de carga comprendida entre 30 y 350 t.

**Figura 6.31.** Características de los volquetes rígidos (Fuente: Caterpillar).



En la extracción de materiales blandos, como es el caso de las graveras, se utilizan volquetes articulados, que se caracterizan por:

- Tracción a todas las ruedas.
- Todas las ruedas mantienen contacto con el terreno.
- Son adecuados en tramos de transporte horizontales o con poca pendiente.
- Pequeños radio de giro.
- Menor altura de carga de los volquetes convencionales.
- Capacidad de carga comprendida entre 30 y 50 t.

**Figura 6.32.** Características de los volquetes articulados (Fuente: Volvo Trucks).

Las operaciones básicas de trabajo con volquetes son:

- ✿ Recepción de la carga sobre la caja.
- ✿ Transporte al punto de vertido.
- ✿ Descarga del material.
- ✿ Retorno al punto de carga.

El llenado de la caja puede hacerse con excavadora hidráulica o pala de ruedas. En cada caso el volquete se estaciona de forma que la máquina de carga consiga su máxima efectividad y rendimiento.

El ciclo de transporte incluye periodos de aceleración y de frenado, y de desplazamiento con velocidad mantenida que depende de las condiciones de la pista, el tráfico, la tracción disponible del vehículo y la longitud de transporte.

La descarga del material se realiza sobre la tolva de la planta de machaqueo fija, o sobre la tolva de una planta de machaqueo semimóvil o de cribado móvil.

El retorno al punto de carga con el volquete vacío se produce a mayor velocidad e incluye la maniobra de posicionamiento en la máquina de carga.

Las áreas de carga y vertido deben estar acondicionadas para facilitar las maniobras y en condiciones de seguridad de operación.

La definición de las características básicas, se determina a partir de los siguientes datos:

- Producción requerida y organización del trabajo.
- Producción anual, mensual, diaria y horaria.
- Horas por relevo y número de relevos.
- Características del material a transportar:
  - Densidad in situ, esponjamiento.
  - Granulometría, tamaños máximos y mínimos.
  - Dureza, abrasividad.
  - Pegajosidad.
- Condiciones ambientales.
- Efecto de lluvias y heladas y temperatura ambiente.
- Características de las pistas de transporte.
- Longitud y pendiente:
  - Anchura, radio de las curvas, resistencia a la rodadura, sistemas de drenaje.
  - Equipos de mantenimiento y construcción.

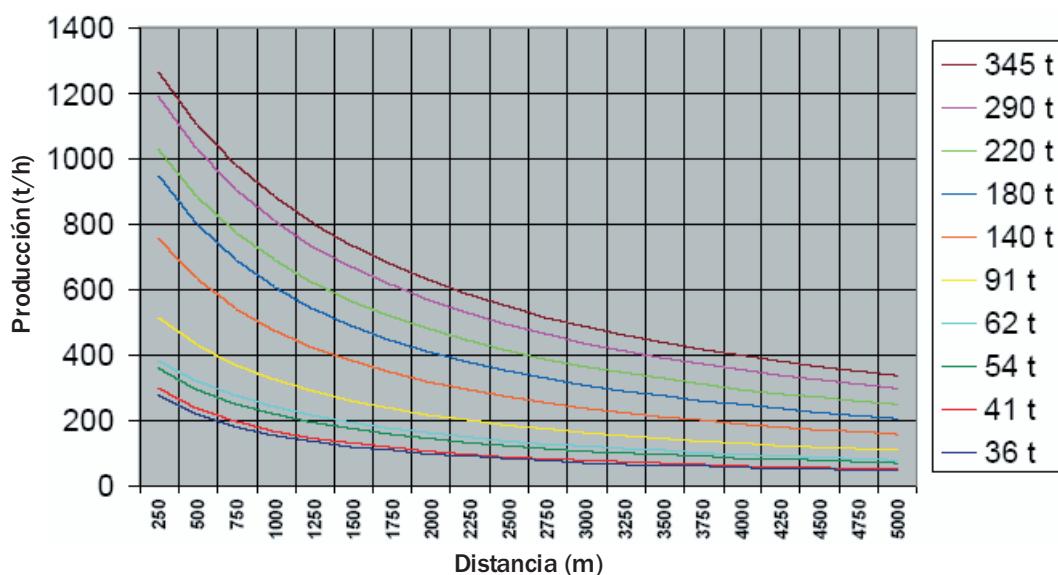
✿ Carga:

- Amplitud de la zona de carga y estado.
- Equipo de carga, tipo de máquina, tamaño de cazo, altura de descarga y alcance.

✿ Descarga

- Amplitud de la zona de descarga.

En la Fig. 6.33 se calcula la producción en función de la capacidad del volquete y de la distancia de transporte por una pista con un 10% de pendiente y un 2% de resistencia a la rodadura.



**Figura 6.33.** Producción horaria según capacidad del volquete y distancia de trayecto (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

En la Tabla 6.15 se determina el número y capacidad de los volquetes en función de la producción y del tipo de roca, para una distancia de 1.000 metros entre el punto de carga y el de descarga.

El consumo de gasoil en la operación de transporte es función de la producción y del tipo de roca a transportar, que a su vez depende de la pendiente y la resistencia a la rodadura de la pista, Tabla 6.16.

**Tabla 6.15.** Número y capacidad del volquete según producción y tipo de roca a cargar.

PRODUCCIÓN (t/h)			Nº EQUIPOS X CAPACIDAD VOLQUETE (t)		
GRANITO	CALIZA	GRAVA	GRANITO	CALIZA	GRAVA
310	401	471	3x40t	3x40t	3x40t
351	450	524	4x40t	4x40t	3x40t
471	591	675	4x50t	3x50t	3x50t
539	670	757	3x60t	4x50t	4x50t
689	842	936	4x60t	4x60t	4x60t
780	945	1042	4x90t	4x60t	4x60t
1088	1289	1389	6x60t	5x60t	6x60t
1259	1476	1575	7x60t	6x60t	7x60t

La potencia del volquete en HP vale  $11xt$ , siendo  $t$  la capacidad del volquete en toneladas.

**Tabla 6.16.** Consumo promedio de gasoil en el transporte según producción y tipo de roca.

PRODUCCIÓN (t/h)			CONSUMO (l/t)		
GRANITO	CALIZA	GRAVA	GRANITO	CALIZA	GRAVA
310	401	471	0,34	0,26	0,22
351	450	524	0,40	0,31	0,20
471	591	675	0,37	0,22	0,20
539	670	757	0,29	0,26	0,23
689	842	936	0,31	0,25	0,23
780	945	1042	0,41	0,22	0,20
1088	1289	1389	0,29	0,20	0,23
1259	1476	1575	0,29	0,21	0,23
Promedio:			<b>0,34</b>	<b>0,24</b>	<b>0,22</b>

Como se ha indicado anteriormente, un punto muy importante **es el diseño, construcción y mantenimiento de las pistas de transporte**, ya que las ventajas derivadas de unas buenas pistas son:

- ✿ Menor número de unidades de transporte para una capacidad de producción dada.
- ✿ Mayores velocidades de los vehículos y por consiguiente productividades más altas.
- ✿ Menor consumo de combustible.
- ✿ Mayor vida de los neumáticos.
- ✿ Menores costes de reparación y mantenimiento.
- ✿ Disminución de los tiempos muertos por averías.
- ✿ Mayor eficiencia de los operadores.
- ✿ Trabajo en mejores condiciones de seguridad.
- ✿ Menores costes y, por consiguiente, mayor rentabilidad económica.

Se establece la siguiente clasificación de volquetes, en función de la capacidad de carga:

CATEGORÍA	CARGA MÁXIMA
P1	< 45 t
P2	< 70 t
P3	< 105 t
P4	< 160 t

En función de la categoría, se tienen las siguientes dimensiones geométricas:

CATEGORÍA	LONGITUD (m)	ANCHURA (m)	RADIO DE GIRO (m)
P1	9,2	4,5	9,6
P2	10,3	4,9	11,7
P3	11,4	6,1	13,4
P4	12,6	7,1	15,3

La anchura de la pista se establece en función del número de carriles y de la categoría del vehículo:

CATEGORÍA	ANCHURA 1 CARRIL (m)	ANCHURA 2 CARRILES (m)
P1	9-11,30	13,5-15,8
P2	9,8-12,30	14,7-17,20
P3	12,20-15,30	18,3-21,40
P4	14,2-17,80	21,3-24,90

Se denomina *firme de una pista* a la estructura formada por varias capas de materiales rocosos, que se coloca sobre la explanación, para facilitar la rodadura y reparte las cargas de los vehículos, para evitar que se produzcan deformaciones permanentes. Además, protege a la explanada de la acción de los agentes atmosféricos, principalmente la lluvia.

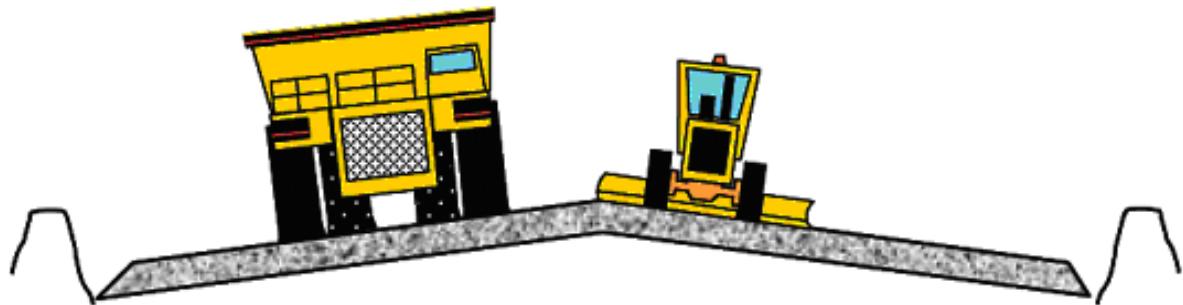
La categoría de la explanada se establece en función de su capacidad de soporte C.B.R. (*California Bearing ratio*):

CATEGORÍA	CAPACIDAD SOPORTE	TIPO MATERIAL
S1	3< C.B.R.<5	Limos y arcillas
S2	5< C.B.R.< 10	Arenas arcillosas
S3	10< C.B.R.< 30	Arenas y gravas con algo de arcilla rocas alteradas
S4	C.B.R.> 30	Gravas limpias y roca sana

A continuación se establece el dimensionamiento de la capa de base y subbase en función de la capacidad soporte y categoría del vehículo:

- La **subbase** se podrá hacer con la fracción fina de la voladura 0-500 mm o la fracción gruesa de la planta de machaqueo 0-300 mm, pero de forma que el tamaño máximo sea inferior al 50% de la altura de capa.
- La **capa de base** se efectuará con áridos de machaqueo en los tamaños 10-15 mm, dejando una capa de rodadura de 3 cm, con el tamaño 4-6 mm.

El material de la capa de subbase se extenderá con tractor de orugas para espesores mayores de 50 cm y con motoniveladora los espesores menores. Y, el material de la capa de base se extenderá con motoniveladora.



**Figura 6.34.** Mantenimiento de las pistas de transporte (Fuente: Caterpillar).

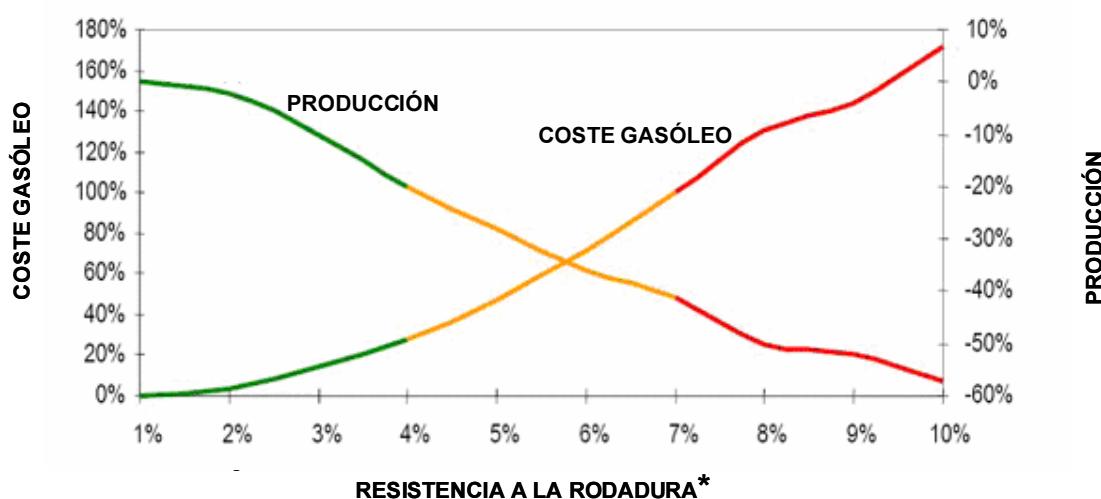
Cada capa de extendido se compactará con rodillo antes de proceder a extender una nueva capa.

Hay que diseñar y calcular las cunetas de drenaje a ambos lados de la pista y con una profundidad mínima de 30 cm por debajo de la explanada. Asimismo hay que tener en cuenta los pasos de agua.

La conservación de una pista ha de perseguir los siguientes objetivos:

- ✿ Mantener el nivel de producción con la maquinaria disponible, operando con las unidades a los ritmos previstos.
- ✿ Reducir los costes totales de producción mediante la disminución de los costes de operación y el aumento de la vida de los vehículos.
- ✿ Disponer de unas condiciones de seguridad y eficiencia óptimas.

En la Fig. 6.35 puede observarse como se produce la disminución de la producción y el aumento del consumo de gasoil, debido al aumento de la resistencia a la rodadura como consecuencia de no realizar la construcción y el mantenimiento adecuado en la pista.



\* Un 5% de aumento en RR da lugar a una producción un 10% menor y a un aumento de los costes de un 35%

**Figura 6.35.** Consumo de gasóleo en la operación de transporte  
(Fuente: Caterpillar).

Las máquinas que se utilizan en la construcción y mantenimiento de las pistas son:

- ✿ Motoniveladoras. Para el extendido de materiales de aportación, reperfilado de las superficies de rodadura y retirada de materiales caídos en las pistas durante el transporte.
- ✿ Tractores de orugas. Para excavación y relleno de zonas deterioradas y construcción de nuevos trazados.
- ✿ Camiones de riego. Para eliminación del polvo en las pistas.
- ✿ Rodillo compactador. Para compactación de los materiales incorporados al firme.

Como la unidad específica es la motoniveladora, se ha calculado el consumo de la misma en función de la producción y el tipo de material, siendo el valor promedio de:

- ✿ Granito: 0,030 l/t.
- ✿ Caliza: 0,025 l/t.
- ✿ Grava: 0,023 l/t.



**Foto 6.8.** Motoniveladora (Fuente: Caterpillar).

La tendencia en los últimos años ha sido el desarrollo de sistemas informáticos con aplicación del GSI, para reportar y controlar la posición, el número de ciclos y la realización de partes sin la participación del conductor.

## CINTAS TRANSPORTADORAS

El empleo de cintas transportadoras se produce con las plantas móviles y semimóviles de trituración y las plantas móviles de cribado, transportando los materiales hasta la planta de trituración secundaria y/o terciaria, que es desde donde se produce la expedición de los productos finales.

Las ventajas de las cintas frente a los volquetes son las siguientes:

- Coste de operación y mantenimiento menor, requiriendo mucha menor mano de obra.
- Las cintas tienen una mejor eficiencia energética, del 75%, frente al 45% de los volquetes. Esta diferencia se acentúa al aumentar el desnivel.
- La energía consumida en las cintas es eléctrica frente al gasoil de los volquetes.
- La capacidad del transporte es independiente de la distancia.
- Se reducen las longitudes de transporte ya que frente a una pendiente remontable del 33% para las cintas, los volquetes tienen un 10%.
- El coste de construcción y mantenimiento de las pistas se reduce debido a la menor anchura, longitud e intensidad de circulación.
- La vida operativa de las cintas es mayor que la de los volquetes.
- La operación es menos sensible a las condiciones meteorológicas.
- Las condiciones ambientales son mejores por la menor emisión de polvo y ruido.
- El proceso productivo es fácilmente automatizable.
- El sistema es válido desde producciones de 300 t/h hasta 30.000 t/h.

Mientras que los inconvenientes son:

- Tiene una mayor inversión inicial.
- Tiene poca versatilidad para aumentar o modificar la producción, por lo que se requiere una cuidadosa planificación.

- ✿ Cuando se dispone de varias unidades en serie, la disponibilidad del conjunto disminuye por lo que se requiere un grado de cobertura suficiente.
- ✿ Requiere un triturado previo de la roca, hasta llegar a un tamaño máximo de 17-30 cm, en función del ancho de banda.

En la Tabla 6.17 se comparan, mediante una serie de parámetros e índices los dos sistemas de transporte -volquetes/cintas transportadoras-, destacando que desde un punto de vista estrictamente energético el transporte con cinta es del orden de 5 a 6 veces más eficiente, lo que al final se traduce en unos costes operativos de hasta tres veces menos.

**Tabla 6.17.** Comparación entre volquetes y cintas transportadoras.

PROPIEDADES	VOLQUETES	CINTAS TRANSPORTADORAS
PENDIENTE REMONTABLE (%)	10	30
CAPACIDAD DE CARGA (%)	50 a 60	90 a 95
Nº DE OPERADORES	1	0
CONSUMO ENERGÉTICO	0,5 – 1,0 kW/t km	0,1 – 0,15 kW/t km
COSTE/t	0,3 – 0,5 €/t km	0,1 – 0,15 €/t km
TAMAÑO DE FRAGMENTOS	SIN LÍMITE PRÁCTICO	30% ANCHURA DE CINTA

La configuración básica de una cinta transportadora tiene los siguientes elementos constitutivos:

- ✿ Bastidores. Llevan las estaciones de rodillos superiores e inferiores que soporan la banda
- ✿ Las estaciones de cabeza y cola, que disponen de los tambores motrices, tambores de reenvío, de tensado y tambores guía.
- ✿ Dispositivo de tensado de la banda.
- ✿ La banda con forma de artesa en el ramal superior para el transporte del producto.
- ✿ El grupo motriz.

En la Tabla 6.18 se determina en función del material y de la producción, el ancho de banda y la velocidad de transporte.

**Tabla 6.18.** Características de los transportadores en función de la roca y de la producción.

GRANITO			CALIZA			GRAVA		
PRODUC. (t/h)	ANCHO (mm)	VEL. (m/s)	PRODUC. (t/h)	ANCHO (mm)	VEL. (m/s)	PRODUC. (t/h)	ANCHO (mm)	VEL. (m/s)
315	500	2,5	408	650	2,5	380	650	2,5
357	500	3,0	472	650	2,5	439	650	2,5
472	650	2,5	612	650	3,0	569	650	3,0
536	650	3,0	708	650	3,5	658	650	3,5
689	650	3,5	918	800	3,5	853	800	3,5
778	800	3,0	1.056	900	3,5	982	900	3,5
-	-	-	1.500	1.000	4,0	1.395	1.000	4,0

Según los resultados del estudio expuesto por Eloranta (2006) sobre los costes de transporte para los sistemas convencional cíclico con volquetes y con cinta transportadora, en diferentes escenarios en cuanto a distancia de transporte en horizontal (longitud) y vertical (desnivel), y producción anual, se concluye que:

- Como ya se ha adelantado al inicio de este epígrafe, el transporte por cinta es el sistema globalmente más eficaz, con unos costes operativos de hasta tres veces menos.
- En el transporte horizontal, la longitud mínima para obtener menor coste de transporte por cinta es de 2,5 km, situación, por otra parte, poco habitual en las canteras de la Comunidad de Madrid.
- La ventaja del sistema por cinta transportadora, aumenta cuando hay desnivel entre la cantera y la planta de machaqueo.

### **6.3.2.2. Trituración y clasificación**

Es necesaria una reducción desde los tamaños obtenidos en la voladura o en los tamaños naturales en las graveras hasta llegar a los productos comerciales:

- ✿ 0,06-2 mm
- ✿ 2-4 mm
- ✿ 4-8 mm
- ✿ 8-12 mm
- ✿ 12-18 mm
- ✿ 18-25 mm
- ✿ 25-32 mm

Esta reducción de tamaño se realiza mediante operaciones de trituración combinadas con operaciones de clasificación mediante cribas.

Las etapas utilizadas en la reducción de tamaños suelen ser:

TAMAÑO	DENOMINACIÓN
1.000-200 mm	TRITURACIÓN PRIMARIA
200-40 mm	TRITURACIÓN SECUNDARIA
40-8 mm	TRITURACIÓN TERCIARIA

En rocas blandas, como las calizas, la trituración secundaria, se realiza normalmente desde 200 mm hasta llegar a 10 - 15 mm, eliminándose la trituración terciaria.

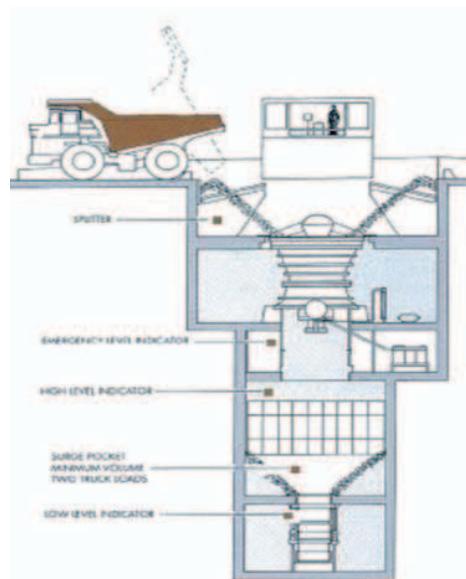
La trituración se realiza mediante dos sistemas básicos: compresión e impacto. Al primer sistema pertenecen los conos y las machacadoras de mandíbulas. Y, al segundo sistema pertenecen los impactores de eje horizontal y vertical.

#### **TRITURACIÓN PRIMARIA**

Los trituradores primarios más utilizados son los trituradores giratorios y las machacadoras de mandíbulas.

Los **TRITURADORES GIRATORIOS** constan de una mandíbula fija en forma de tronco de cono invertido, en el interior del cual se mueve de forma excéntrica otro tronco de cono, denominado cabeza. La trituración se produce mediante el cabeceo de la cabeza comprimiendo la roca contra la mandíbula fija. Al mismo tiempo que se realiza la aproximación en un punto, en el diametralmente opuesto se realiza una apertura permitiendo la salida del material triturado.

- Las capacidades de producción oscilan entre 700-10.000 t/h.
- El coeficiente medio de reducción es de 3 a 4.
- El tamaño máximo de alimentación es de 700-1.000 mm.
- El producto final está en el rango 100-300 mm.
- El porcentaje de finos producido en el proceso es de 10-15% en rocas ígneas y del 15-20% en calizas.



**Figura 6.36.** Características de los trituradores giratorios (Fuente: Metso Minerals).

Las ventajas del sistema son:

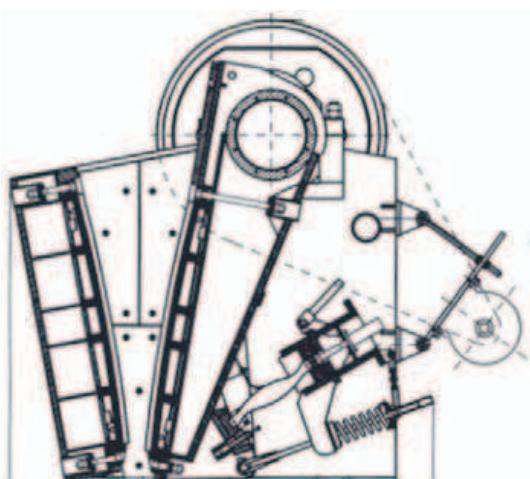
- ✿ Permiten la descarga directa de los volquetes, no precisándose alimentador.
- ✿ Proporcionan una gran capacidad de producción.
- ✿ Tienen el menor coste de mantenimiento por tonelada producida.
- ✿ Proporciona la mayor disponibilidad de todas las trituradoras primarias.
- ✿ Son aptas para rocas muy duras y abrasivas.

Como principal desventaja, son las que requieren la mayor inversión tanto en la propia máquina como en la infraestructura necesaria.

Las **MACHACADORAS DE MANDÍBULAS** pueden ser de doble efecto o Blake y de simple efecto.

Las machacadoras de doble efecto tienen una mandíbula fija y otra móvil articulada en su parte superior sobre un eje que la permite acercarse y alejarse de la anterior para comprimir la roca entre ellas.

Las machacadoras de simple efecto constituyen una simplificación de la anterior, en la que un solo eje hace a la vez de articulación para el giro de la mandíbula y de excéntrica.



- La capacidad máxima de producción es de 750 t/h.
- El coeficiente medio de reducción es de 2 a 3.
- El tamaño máximo de alimentación es de 700-900 mm.
- El producto final está en el rango 100-300 mm.
- Requiere alimentador, normalmente provisto de un precribado que elimina los finos.
- El porcentaje de finos producido en el proceso es del 3-6% en rocas ígneas y del 10-20% en calizas.

**Figura 6.37.** Características de las machacadoras de mandíbulas  
(Fuente: Metso Minerals).

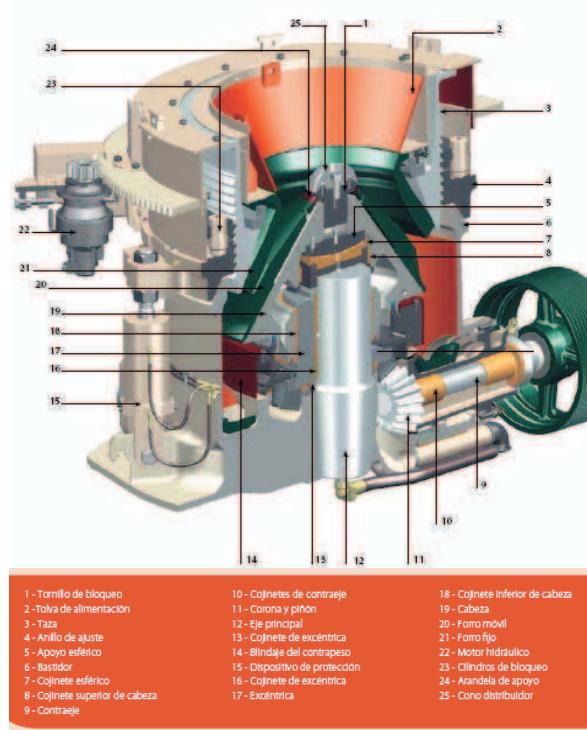
Las ventajas del sistema son:

- Menor coste de inversión que los trituradores giratorios.
- Las machacadoras de doble efecto pueden triturar materiales muy duros y abrasivos.
- Las machacadoras de simple efecto tienen un coste menor que las de doble efecto pero no pueden triturar materiales tan duros y abrasivos.

## TRITURACIÓN SECUNDARIA Y TERCIARIA

Los trituradores secundarios más usados son los conos y los impactores de eje horizontal, mientras que los trituradores terciarios utilizados son los conos y los impactores de eje vertical.

Los **CONOS** son trituradores giratorios con una excentricidad y velocidad mayor que los primarios.



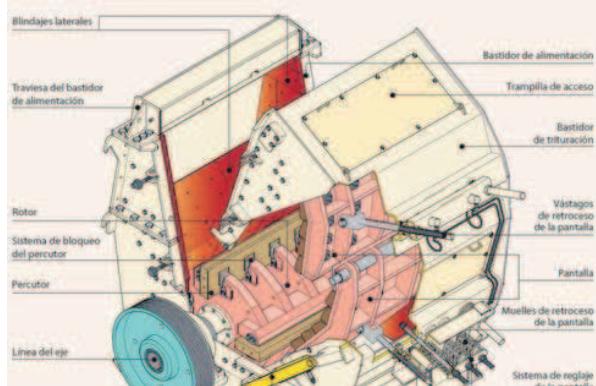
- Las capacidades de producción oscilan entre 90 y 260 t/h como trituradores secundarios y entre 40 y 160 t/h trabajando como trituradores terciarios.
- Tienen una mayor flexibilidad que las trituradoras de impacto y desarrollan mayores fuerzas de trituración.
- El coeficiente de reducción es de 4 a 5.
- El tamaño de alimentación es de 100-250 mm en los secundarios y de 14-100 mm en los terciarios.
- El producto final es de 20-100 mm.
- El porcentaje de finos es del 0-23% en rocas ígneas y del 15-25% en caliza.
- Tienen mayor coste que los impactadotes, son más robustos y duraderos, pero de mayor complejidad y de mantenimiento más complicado.
- La potencia necesaria es relativamente baja.
- Tienen peor coeficiente de forma.
- El coste de desgaste es relativamente bajo.

**Figura 6.38.** Características de los trituradores secundarios tipos conos  
(Fuente: Metso Minerals).

Es conveniente trabajar con la cámara llena, consiguiéndose mayores reducciones, mejores coeficientes de forma, aumento de la producción y menores desgastes. Para conseguir este objetivo se utilizan los prestock entre la trituración primaria y la secundaria, independizando de esta forma estas dos operaciones y deben utilizarse tolvas con alimentadores regulados con el molino y con una capacidad de unos 6 minutos de producción.

El molino cuando se utiliza como triturador terciario, debe hacerse en circuito cerrado, consiguiéndose, mayor reducción del material y mejor coeficiente de forma con una disminución de la producción.

Los **IMPACTORES DE EJE HORIZONTAL** consisten en trituradores de uno o dos tambores recubiertos de placas de desgaste reemplazables.



Las características más importantes son:

- Relaciones de reducción medias de 10 a 15.
- Alimentación a 200 mm y tamaño de salida a 30 mm.
- Capacidad hasta 2.000 t/h.
- Tienen menor inversión que los conos.
- Producen un porcentaje de finos del 30 al 40%.
- Proporcionan un mejor coeficiente de forma en el material.
- No son adecuados para materiales abrasivos ( $> 8\%$  sílice), y sí en materiales blandos como las calizas, logrando eliminar la trituración terciaria.
- El consumo energético es mayor que en los conos.
- Tienen muy buen coeficiente de formas.
- Producen granos más resistentes.

**Figura 6.39.** Características de los impactores de eje horizontal  
(Fuente: Metso Minerals).

El **IMPACTOR DE EJE VERTICAL** consiste en un rotor que gira alrededor de un eje vertical, en el que se introduce el material a triturar por un orificio central en la parte superior y es proyectado a gran velocidad por tres salidas periféricas en el interior de la cámara de trituración.

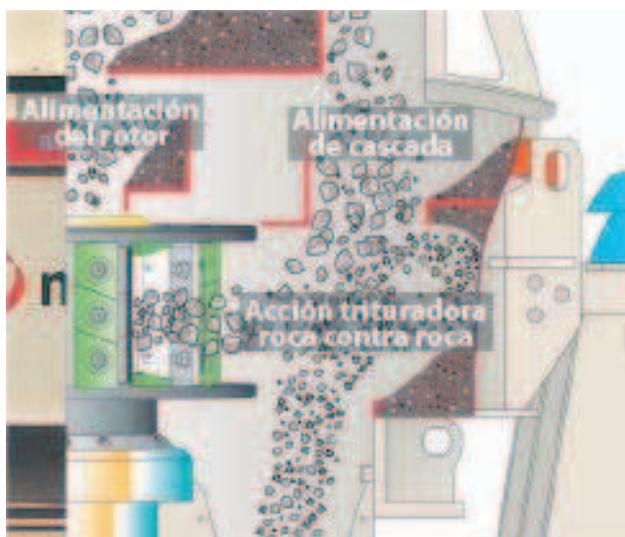
Tanto las paredes del rotor como la cámara están recubiertas del propio material a triturar, produciendo la trituración roca contra roca y disminuyendo el desgaste.

La fragmentación del material se debe a los siguientes efectos:

- ✿ Impacto y choque (pocos finos).
- ✿ Rotura debido a las microgrietas (pocos finos).
- ✿ Frotamiento o roce (finos).
- ✿ Abrasión (muchos finos).

## PRECRIBADORES Y CRIBAS

Normalmente, los productos provenientes de la molienda o el machaqueo no se ajustan a las granulometrías comerciales, por lo que es necesario disponer de unos procedimientos de selección por tamaños que permitan obtener las fracciones adecuadas.



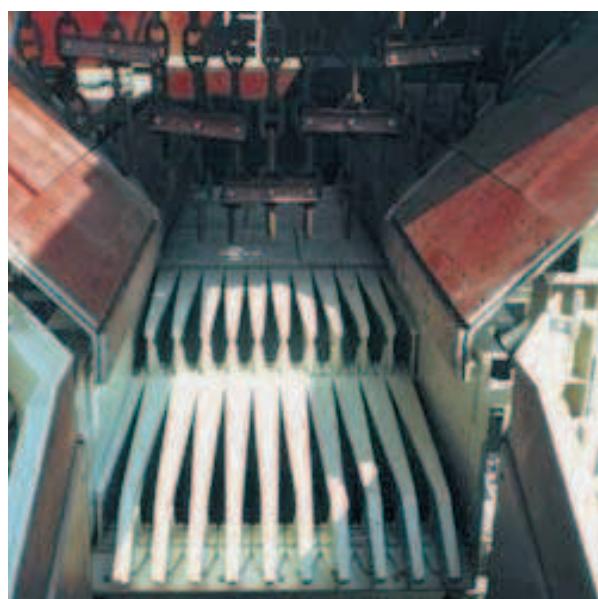
Las características más importantes son:

- Alimentación a 50 mm y salida a 3 mm.
- Producciones elevadas, hasta 600 t/h.
- Buena forma cúbica.
- Producción de finos importante

**Figura 6.40.** Características de los impactores de eje vertical  
(Fuente: Metso Minerals).

Por ello, la clasificación es una fase muy importante del proceso, para obtener granulometrías exactas y porcentajes de desclasificados muy pequeños.

En los áridos el control granulométrico se realiza mediante un proceso normalizado de cribado.



**Foto 6.9.** Detalle de un precribador (Fuente: Metso Minerals).

Los **PRECRIBADORES** eliminan los materiales arcillosos o limosos que acompañan al todo uno procedente del frente de explotación, con ello se consigue que estos materiales no interfieran en el buen funcionamiento de las diferentes unidades y se consigue un árido de calidad.

Se colocan antes del triturador primario y suelen ser de barras con una o dos etapas de precribado.

Las **CRIBAS** más utilizadas son las vibrantes de contrapeso, con un máximo de tres bandejas, para no disminuir la eficacia del corte.



**Foto 6.10.** Planta de tratamiento secundario: sistema de cintas y cribas  
(Fuente: Metso Minerals).

Los parámetros de diseño son:

- ✿ Naturaleza, densidad, grado de humedad y estado.
- ✿ Curva granulométrica de entrada.
- ✿ Tamaños finales.
- ✿ Eficacia deseada.

### **6.3.2.3. Plantas Fijas, Semimóviles y Móviles**

Los elementos que constituyen una planta móvil o semimóvil son:

- Tolva de alimentación.
- Alimentador precribador.
- Machacadora.
- Instalaciones auxiliares.
- Chasis.
- Sistema de traslación.

La tolva de alimentación regula las fluctuaciones de producción de la máquina de carga, reduciendo los tiempos en vacío.

El alimentador precribador proporciona una alimentación constante de la machacadora, eliminando los finos.

La machacadora más utilizada es la de mandíbulas para producciones de hasta 700 t/h; por encima de esa producción se emplean los giratorios o el sistema de rodillos denominado Roller-Sizer.

Los elementos auxiliares están constituidos por grúas para el mantenimiento y martillos hidráulicos, para la eliminación de bolos.

El chasis debe resistir las tensiones producidas durante la trituración.

El sistema de traslación más utilizado en las machacadoras móviles es el de orugas, mientras que en las semimóviles de más de 300 t de peso, se emplean los carros transportadores de orugas.

### **6.3.2.4. Tratamiento por vía húmeda**

El tratamiento por vía húmeda se emplea en el proceso de gravas y en la recuperación de arenas, de las aguas de lavado de los productos finales y del tratamiento de las zahorras procedentes del precribado.

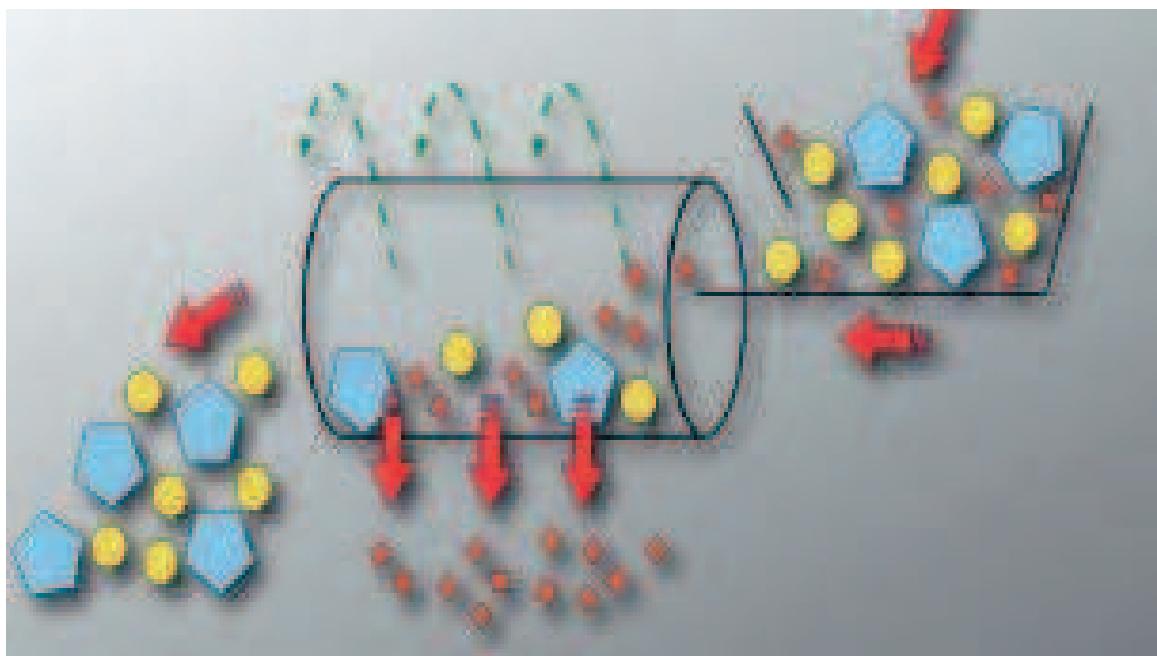


**Foto 6.11.** Cintas móviles modulares para el transporte desde una trituradora móvil  
(Fuente: Metso Minerals).

Los equipos utilizados para el *tratamiento de áridos gruesos* son:

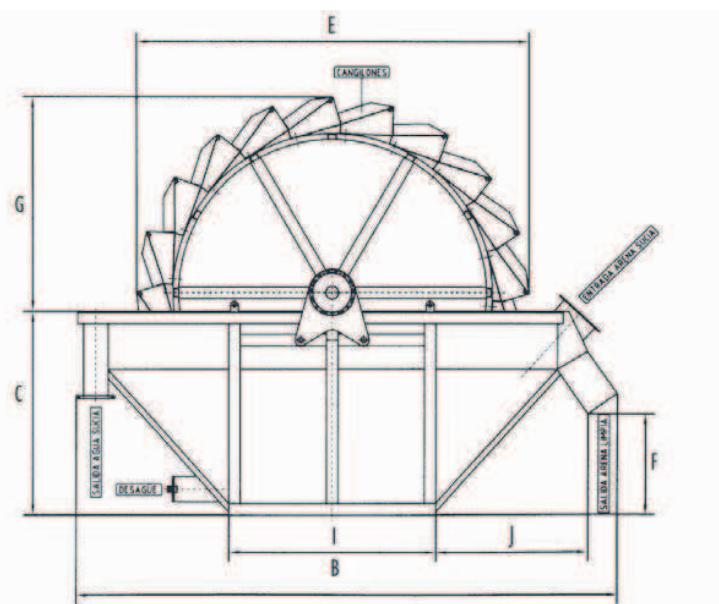
- ✿ **TRÓMELES**, utilizados para el lavado de granulometrías altas de rocas y gravas contaminadas con arcillas, con tamaños de entrada 0-400 mm. Se consigue una *disgregación* mediante el *volteo* combinado con la acción del agua. Pueden disponer de paletas y pueden forrarse con goma en materiales abrasivos.
- ✿ **LAVADORES DE PIEDRA** (*Log-whaser*), tienen uno o dos ejes inclinados, consiguiéndose un efecto de fricción, con un lavado en contracorriente de agua. La cantidad de agua depende de la suciedad del material. Se emplea con granulometrías medias, con tamaño de entrada 0 - 120 mm, eliminando previamente la fracción de arenas.

Para la recuperación de las arenas contenidas en la fracción fina de las graveras y las aguas de lavado de los productos obtenidos en la trituración terciaria durante el cribado húmedo, se utilizan ruedas decantadoras o norias e hidrociclo-nes.



**Figura 6.41.** Esquema del efecto de segregación por fricción de un lavador de piedra (Fuente: Eral).

Las **NORIAS** emplean la clasificación por gravedad, basándose en la diferencia de la velocidad de sedimentación de las partículas en un medio líquido, según su tamaño. Las partículas gruesas, caen rápidamente al fondo, mientras que las más finas permanecen en suspensión. El corte se tiene en 0,1 mm.



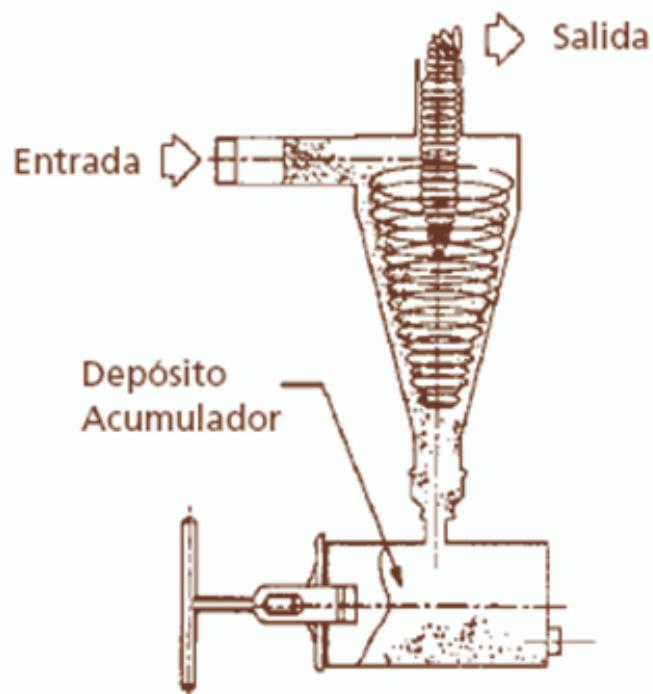
**Figura 6.42.** Noria para lavado y recuperación de arenas (Fuente: Triman).

El rechazo de la noria pasa al ciclón.

En los **HIDROCICLONES** se sustituye la acción de la gravedad, por la de la fuerza centrífuga, sedimentando la arena en sentido radial hacia la pared del ciclón.

El ciclón clasifica entre 50 y 80 micras.

Las arenas lavadas y clasificadas pasan a un escurridor para disminuir el contenido de agua hasta un 10 - 15%.

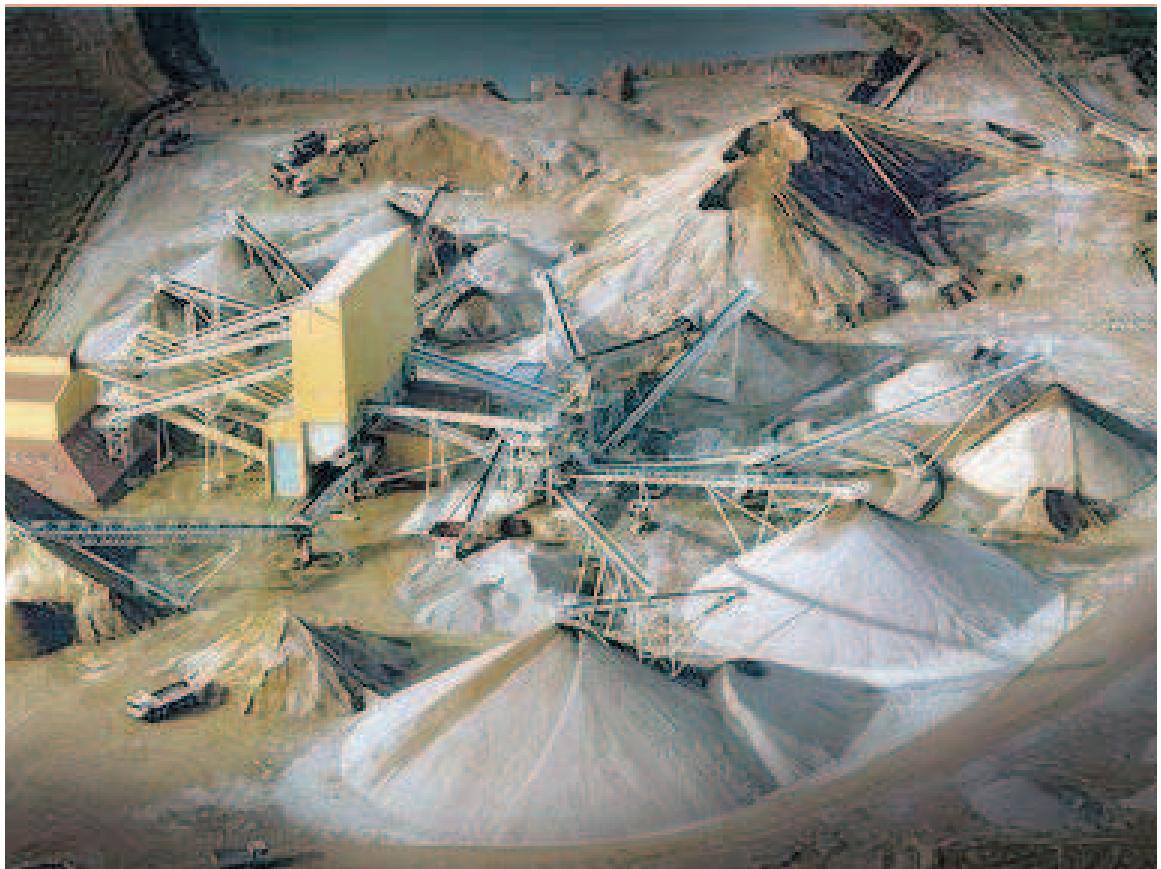


**Figura 6.43.** Esquema de un hidrociclón (Fuente: Triman).

#### 6.3.2.5. Almacenamiento de productos finales

En capacidades de producción pequeñas se emplea el almacenamiento en **TOLVAS**, para reducir el coste de manipulación.

En capacidades grandes, se acopia al aire mediante cintas apiladoras, pero disponiendo de un sistema de túnel alimentador y cinta de carga.



**Foto 6.12.** Panorámica de una planta de tratamiento en la que la mayoría de los acopios se ubican al aire libre (Fuente: Metso Minerals).

#### 6.3.2.6. Tratamiento de aguas de proceso

Hay que procurar obtener vertidos 0, para lo que se precisa un tratamiento de las aguas de proceso.

El proceso tipo es decantación después de añadir un floculante, normalmente en tanque decantador, con lo que se obtiene agua clarificada que se devuelve al proceso, reduciendo el aporte de agua fresca y un lodo concentrado que se trata en filtro prensa. Los lodos secos se pueden utilizar en las labores de restauración de la cantera o son vertidos a la escombrera junto con los estériles.



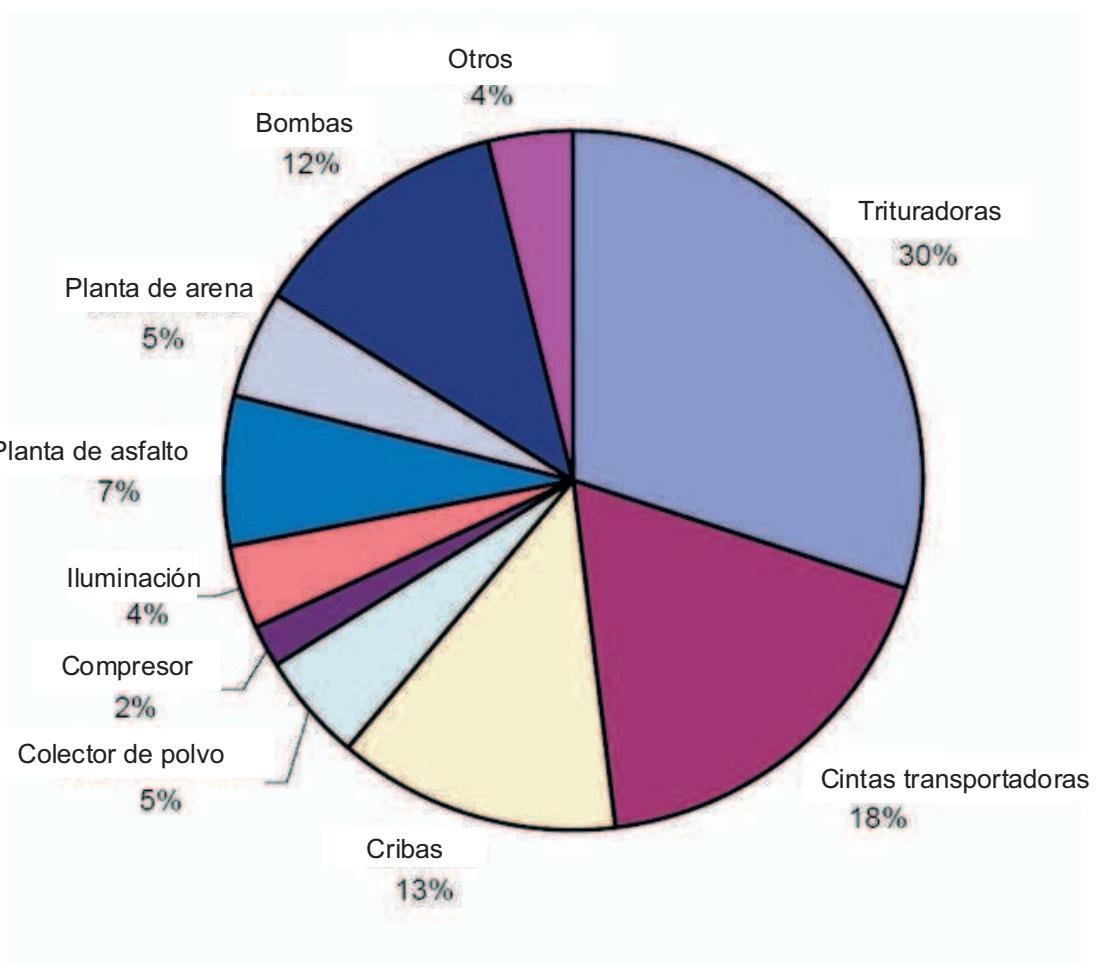
**Figura 6.44.** Esquema del recorrido del agua empleada en el lavado de arenas, mediante recuperación del agua de proceso (Fuente: Eral).

### 6.3.2.7. Consumos energéticos

La distribución media de la potencia instalada en una planta de machaqueo y clasificación es la siguiente:

- ✿ Trituración: 39%
- ✿ Cintas: 24%
- ✿ Cribas: 17%
- ✿ Bombas, compresores, iluminación: 20%

El mayor consumo se produce en la trituración. En la Tabla 6.19 se indica la distribución media de consumo según el tipo de trituración realizada y la naturaleza de la roca tratada.



**Figura 6.45.** Consumo energético por sectores en una planta de tratamiento de áridos (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

**Tabla 6.19.** Distribución media de consumo energético según proceso y tipo de roca.

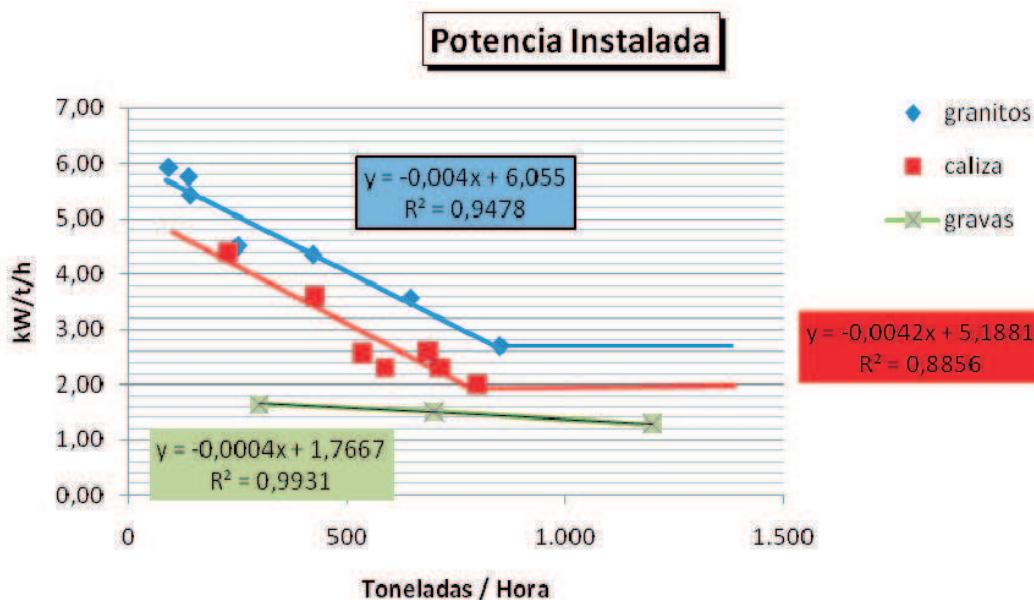
TRITURACIÓN	GRANITO	CALIZA	GRAVA
PRIMARIA	19%	17%	-
SECUNDARIA	25%	83%	
TERCIARIA	56%	-	100%

La potencia instalada kW/t/h, y el consumo específico, kWh/t, dependen de la producción horaria y del tipo de material.

Se tienen las siguientes ecuaciones:

### Potencia instalada

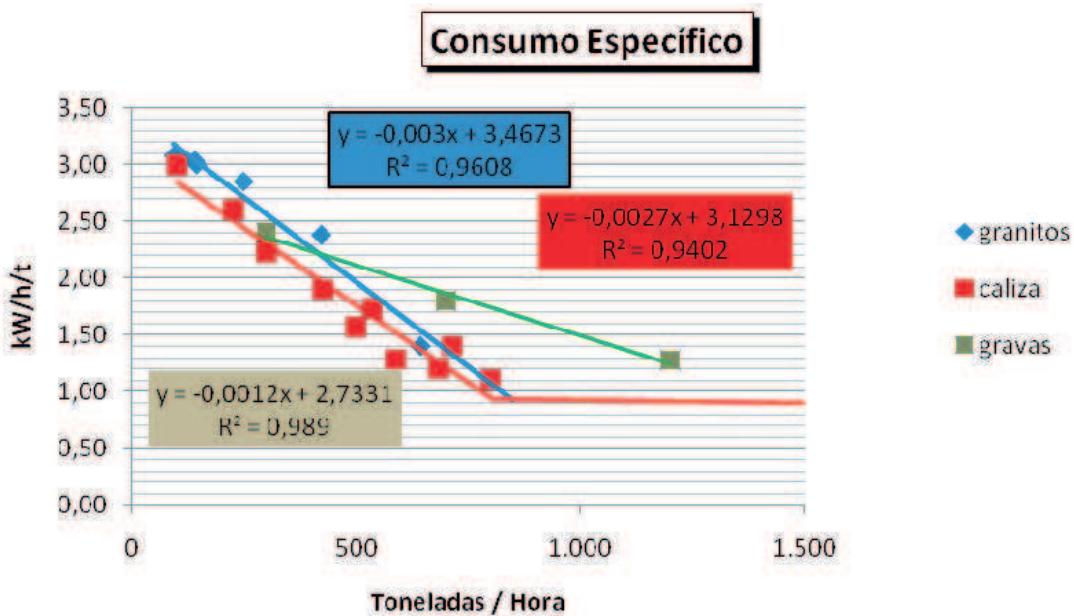
- ✿ GRANITO kW/t/h =  $6,055 - 0,004xt/h$ , valor mínimo 2,7 kW/t/h
- ✿ CALIZA kW/t/h =  $5,188 - 0,0042xt/h$ , valor mínimo 2 kW/t/h
- ✿ GRAVA kW/t/h =  $1,767 - 0,0004xt/h$



**Figura 6.46.** Diferencia entre las potencias instaladas en canteras de piedra caliza y granito, y graveras.

### Consumo específico

- ✿ GRANITO kW/h/t =  $3,467 - 0,003xt/h$ , por encima de 800 t/h: 1,4 kWh/t
- ✿ CALIZA kW/h/t =  $3,130 - 0,0027xt/h$ , por encima de 850 t/h: 1,2 kWh/t
- ✿ GRAVA kW/h/t =  $2,733 - 0,0012xt/h$



**Figura 6.47.** Diferencia entre los consumos energéticos entre cantera de caliza y granito, y graveras.

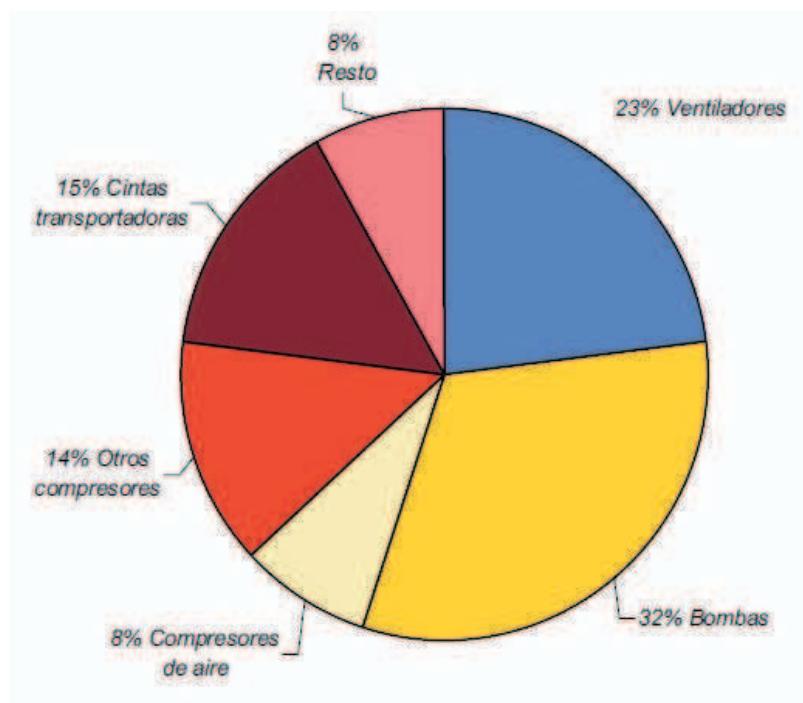
Se puede observar una mayor ineficiencia en el caso de las graveras, debido a que se parte de una granulometría más fina y, por tanto, sólo existe trituración secundaria y terciaria, y a la menor recuperación por la existencia de limos y arcillas.

### 6.3.3. Incorporación de nuevas tecnologías

Dado que en una instalación industrial las partidas destinadas al funcionamiento de la maquinaria y al alumbrado son las principales consumidoras de energía (90% del consumo total), la modernización de los equipos y la incorporación de tecnologías nuevas y más eficientes pueden suponer un ahorro significativo de la energía utilizada, a la vez que se consiguen reducir las cargas contaminantes.

#### MOTORES ELÉCTRICOS DE ALTA EFICIENCIA

El 70% de la energía eléctrica consumida en las industrias reincide en los motores eléctricos que accionan los diferentes dispositivos instalados, Fig. 6.48.



**Figura 6.48.** Distribución de consumo eléctrico en los diferentes accionamientos  
(Fuente: Guía de Ahorro Energético en Instalaciones Industriales. Comunidad de Madrid, 2006).

Durante su vida útil un motor eléctrico gasta en su funcionamiento cien veces más de lo que costó su compra. Si se adquieren motores de alta eficiencia se puede ahorrar debido al menor coste de la energía consumida, protegiendo el medio ambiente. De hecho, utilizando motores de alta eficiencia y con un buen mantenimiento se puede llegar a ahorrar entre un 30% y un 50% de la energía consumida en los sistemas accionado por motores eléctricos (bombas, compresores) (MORILLO, A. et al; 2010).

Las principales ventajas de este tipo de motores son dos, fundamentalmente:

- ✿ Menor consumo eléctrico para desarrollar la misma potencia mecánica. A igual potencia mecánica de salida, un motor de bajo consumo tiene mayor rendimiento energético que uno de eficiencia estándar. Un motor de alta eficiencia puede llegar a reducir las pérdidas de energía hasta en un 40%.



**Foto 6.13.** Un motor eficiente (Fuente: Jornadas sobre eficiencia energética en el sector de los áridos. Cátedra ANEFA. Carlos López Jimeno. Febrero 2010).

$$\eta = (\text{Potencia mecánica de salida} / \text{Potencia eléctrica de entrada}) \times 100$$

$\eta$  = Rendimiento del motor

**Figura 6.49.** Fórmula para determinar el rendimiento de un motor.

Además el aumento de rentabilidad energética redundaría en una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

- ✿ Mayor vida útil, gracias a una alta reserva térmica, lo que equivale a un factor de servicio más alto y menores costes de mantenimiento.

Dada la diversidad de clasificaciones energéticas que existen en el mundo, en el año 2008 la IEC (*International Electrotechnical Commission*) creó un sistema único (IEC 60034-30), el cual ha sido asumido también por Europa en el Reglamento (CE) Nº 640/2009 de la Comisión de 22 de julio de 2009, que aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a los requisitos de diseño ecológico para los motores eléctricos.

Esta normativa establece una nueva clasificación energética que sustituye a la clasificación CEMEP (EFF) fruto de un acuerdo europeo voluntario entre la Co-

misión Europea y el comité europeo de fabricantes de maquinaria eléctrica y motores electrónicos:

- IE3: Eficiencia "Premium".
- IE2: Alta eficiencia. Equivalente a EFF1 (motores de alta eficiencia energética).
- IE1: Eficiencia estándar. Comparable a EFF2 (motores de eficiencia mejorada).
- Además, la IEC 60034-30 prevé un nuevo nivel IE4: Eficiencia "Súper Premium", por encima de IE3.

En Europa y Suiza, la adaptación de los motores a esta nueva clasificación se va a ir haciendo cada vez más estricta, así:

- A partir de junio de 2011 será de obligado cumplimiento una clasificación mínima IE2 en motores entre 0,75 kW y 375 kW de potencia.
- A partir de enero de 2015, el rendimiento de los motores de 7,5 kW y 375 kW será IE3.
- Y, a partir de 2017 el marcado IE3 se extenderá también a los motores de 0,75 kW a 5,5 kW.

## VARIADORES DE VELOCIDAD

En la maquinaria de uso industrial los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o quasi-constante y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de Variador de Velocidad (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive).

El Variador de Velocidad es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto

de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. Gracias a la regulación de la velocidad los sistemas donde se emplean estos dispositivos son más eficientes a la par que se incrementa su productividad y el rendimiento de los mismos.

En general, las instalaciones con bombas, ventiladores y compresores son las más susceptibles de poder ahorrar energía con estos sistemas de regulación. En minería, los variadores de velocidad se emplean especialmente en los alimentadores vibrantes, machacadoras, molinos, cintas transportadoras, tolvas y silos.

Entre las diversas ventajas en el control de procesos proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

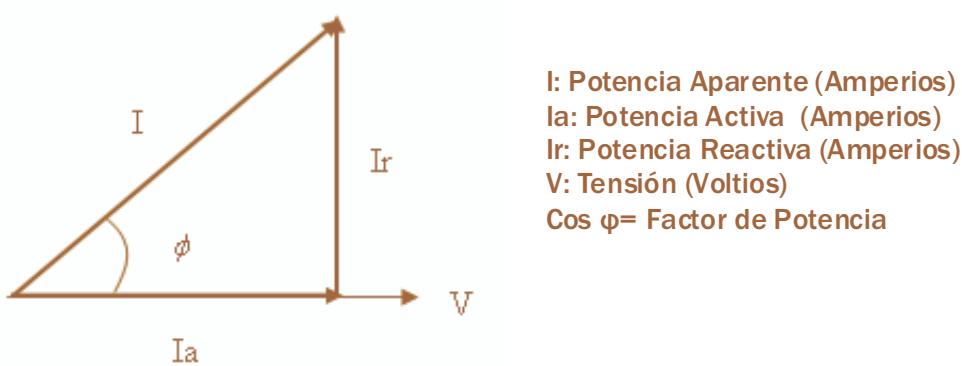
- Menor consumo energético. El ahorro energético puede suponer entre un 30% y un 60%, dependiendo del tipo de instalación y la tecnología del dispositivo.
- Operaciones de arranque más suaves, con baja intensidad de corriente.
- Se pueden acoplar a motores ya existentes.
- Control de la aceleración.
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso.
- Compensación de variables en procesos variables.
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba.
- Ajuste de la tasa de producción.
- Permitir el posicionamiento de alta precisión.
- Reducción del desgaste del sistema y equipamiento, así como una reducción del ruido ambiental.

- Mejoras adicionales como la mejora del Factor de Potencia y Control del Par Motor (torque), y aprovechamiento de la energía de frenado mediante el control optimizado del sistema en aquellos dispositivos que tienen incorporadas estas nuevas tecnologías.

## FACTOR DE POTENCIA Y BATERÍAS DE CONDENSADORES

Otra medida importante a la hora de mejorar la eficiencia energética es la corrección del Factor de Potencia, mediante la utilización de Baterías de Condensadores.

En algunos aparatos eléctricos la cantidad de energía que toman directamente de la red de abastecimiento (Potencia Aparente) es superior a la que realmente emplea en su funcionamiento; una parte del consumo total energético es la denominada Potencia Activa, que es la cantidad de energía eléctrica transformada en trabajo (mecánica, lumínica, térmica, química, etc.), y otra es la Potencia Reactiva, que no es directamente consumida por el aparato eléctrico, pero que es imprescindible para su funcionamiento debido a que de ella dependen entre otros aspectos los campos electromagnéticos inherentes a éste.



**Figura 6.50.** Relación entre potencia activa, aparente y reactiva.

La generación y transporte de un valor determinado de potencia activa obligaría necesariamente a sobredimensionar los centros de generación, líneas de transporte y transformadores reduciendo su vida útil, con el coste adicional que ello supone. Los efectos de la energía reactiva en la red son:

- Incremento de las pérdidas por efecto Joule.
- Sobrecarga de generadores, transformadores y líneas de distribución.
- Aumento de la caída de tensión.

Por ello, la solución clásica es mediante la incorporación de baterías de condensadores que aportan la potencia reactiva requerida localmente por los equipos, pero evitando la existencia de flujos de potencia reactiva por las redes eléctricas.



**Figura 6.51.** Efecto de la instalación de una Batería de Condensadores sobre el triángulo de potencias (Fuente: Montes, P.; 2010).

La instalación de estos dispositivos aporta sustanciales beneficios, tanto ambientales como económicos (Núñez-Barranco P. y Martínez Vázquez J.; 2010):

- Favorece la eficiencia del consumo energético eléctrico al reducir las pérdidas en el transporte.
- Amplía la capacidad de la red eléctrica, ya que todo lo que se produce como extra para contrarrestar las pérdidas podría utilizarse para suministrar electricidad en el consumo.
- Optimiza el diseño de la instalación al evitar que sea necesario incrementar la sección de los conductores por el aumento de la intensidad de corriente, favoreciendo la eficiencia en consumo de recursos.

- ✿ La eliminación de la energía reactiva evita el aumento de la intensidad que obliga a las máquinas eléctricas a trabajar fuera de su punto de diseño, reduciendo su ciclo de vida.
- ✿ Mejora la calidad del suministro eléctrico al eliminar los incrementos de caída de tensión en el transporte, lo que ocasionaría que se suministrara una tensión insuficiente en el consumo, provocando que las cargas (motores, lámparas, etc.) sufrieran una reducción de su potencia de salida.
- ✿ Evitan las penalizaciones en la factura eléctrica (30% de media).
- ✿ Contribuye a la sostenibilidad medioambiental reduciendo el volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> en las centrales productoras de electricidad.

## SOPLANTES DE TORNILLO

Las soplantes son sistemas impulsores de aire o gas, las cuales se emplean en amplia variedad de equipos auxiliares: sistemas de ventilación, gestión de aire comprimido, transporte neumático de materiales a granel en polvo o granulados, y de prácticamente todos los tipos de gas, instalaciones mezcladoras, estaciones móviles de limpieza de silos, etc.



**Foto 6.13.** Soplador de Tornillo (Fuente: Atlas Copco, S.A. ).

Una mejora significativa desde el punto de vista de eficiencia energética en la tecnología de soplantes de aire para pequeños caudales (300 a 500 m<sup>3</sup>/h), ha sido la sustitución de las de lóbulos rotativos "Roots", por las soplantes de tornillo exentas de aceite.

Las pruebas experimentales efectuadas al respecto dan como resultado que la soplante de tornillo es más eficaz con un ahorro en el consumo de energía de hasta un 50% (Van Leuven, G. et al.; 2010).

A grandes rasgos, la diferencia fundamental en el funcionamiento de ambas máquinas es que, mientras la soplante de lóbulos "Roots" no produce ningún cambio en el volumen de aire que entra en la máquina, sólo se desplaza desde el lado de la aspiración al de impulsión contra la resistencia del sistema de descarga, en la soplante de tornillo disminuye el volumen de aire aspirado entre los rotores macho y hembra y la carcasa.

Desde el punto de vista de la termodinámica esta situación se traduce en un menor trabajo de compresión interna, debido a lo cual se reduce el consumo de energía. Si bien, para lograr la máxima eficiencia energética y evitar problemas de subcompresión o sobrecompresión es necesario dimensionar adecuadamente el volumen de entrada de aire, de modo que la relación entre la compresión interna y la del sistema coincidan.

## AUTOMATIZACIÓN DE LAS SECUENCIAS DE CONEXIÓN/DESCONEXIÓN

La automatización de los procesos ofrece a las industrias una importante herramienta de ahorro en el consumo de energía. Algunos fabricantes como la Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos estiman que la modernización de los sistemas de automatización en plantas industriales podría ahorrar hasta un 25% de la energía actualmente utilizada (Francisco D. y Pozo, D.; 2010).

Hasta el momento, los métodos tradicionales de gestión energética en los procesos industriales se han basado en la implementación de sistemas indepen-

dientes para el control de las pausas de movimientos y accionamientos. Los principales inconvenientes de tales sistemas son la pérdida de productividad asociada (falta de discriminación, mayores tiempos de desconexión, descoordinación de acciones, etc.) y la necesidad de implementar un hardware adicional y externo al empleado para el control de la instalación.

Es por ello, que la empresa SIEMENS ha diseñado una interfaz, denominada PROFlenergy, que permite coordinar de manera automática los procesos de desconexión/conexión (pausa/parada/arranque), tanto de dispositivos individuales como secciones de una planta industrial, sin necesidad de hardware externo (Francisco D. y Pozo, D.; 2010).

Los principales beneficios derivados de la implantación de este sistema integrado de gestión energética son los de menores costes de producción y energéticos, debido a la reducción de cargas sin comprometer la productividad y la disponibilidad de las instalaciones, junto a la facilidad de adaptación tanto de la maquinaria como de otros sistemas ya existentes (PROFINET)<sup>6</sup>.

## ALUMBRADO

Como ya se ha expresado con anterioridad, la iluminación en las instalaciones industriales supone del orden de un 25% del consumo total energético.

Aunque cada instalación industrial a iluminar debería ser objeto de un proyecto técnico pormenorizado y particular, dadas las condiciones propias de cada recinto o zona (tamaño, altura de techos, luz natural, iluminación exterior y/o interior, etc.) y las necesidades de la empresa, se puede señalar que el reemplazo de los aparatos de luz convencionales por fluorescentes de última generación, constituyen el futuro de cara a obtener instalaciones más eficientes, ahorrar en la factura eléctrica y evitar penalizaciones.

<sup>6</sup> PROFINET es una aplicación informática desarrollada con el objetivo de favorecer un proceso de convergencia entre la automatización industrial y la plataforma de tecnología de la información de gestión corporativa y redes globales de las empresas.



**Foto 6.14.** Torre móvil de iluminación formada por cuatro lámparas de halogenuro metálico (Fuente: Allman).

Las habituales lámparas de recarga (fluorescentes, de vapor de mercurio a alta presión, de luz de mezcla, con halogenuros metálicos, de vapor de sodio a baja o alta presión), que si bien resultan satisfactorias, presentan algunos aspectos que pueden no adecuarse correctamente a la reglamentación actual (Hernández, S.: 2010):

- Bajo nivel medio de uniformidad.
- Concentración de grandes focos de luminosidad dejando espacios sin cubrir.
- Fallo ante micro cortes de tensión, debiendo esperar para la reconexión de las mismas, a que disminuyan su temperatura para poder volver a arrancarlas.
- Regulación de su flujo luminoso, muy reducida 50% - 100% hasta 250 W.

Por ello, la implantación de eficientes luminarias de fluorescencia, alimentadas por equipos electrónicos, aporta beneficios significativos (Hernández, S. y Rodríguez, J. y López, A.; 2010):

- ✿ Menor potencia contratada. Mejor uniformidad, por lo que para obtener un nivel luminoso general suficiente, la potencia instalada es más baja.
- ✿ Inmunes frente a micro cortes de tensión, encendido inmediato.
- ✿ Posibilidad de regulación del 1% al 100%.
- ✿ Fácil mantenimiento.
- ✿ Mayor duración de la fuente de luz. Su rapidez de encendido la vuelve más versátil, por lo que es más apta para una automatización de encendidos tendente a aprovechar al máximo la luz natural.

Por otra parte, los equipos electrónicos aportan las siguientes ventajas respecto a los tradicionales de tipo electromagnético:

- ✿ Prácticamente nulas pérdidas de energía por calentamiento.
- ✿  $\text{Cos } \phi = 1$  por lo que no hay pérdidas por energía reactiva.
- ✿ Mayor duración del tubo fluorescente por lo que aumenta el tiempo entre sustituciones, descendiendo con ello el coste de mantenimiento.
- ✿ Mejor calidad de luz emitida, con ausencia del efecto estroboscópico típico de la fluorescencia, aumentando el confort visual y reduciendo la fatiga de los operarios.

Respecto a la iluminación exterior, también es susceptible de mejoras en cuanto a eficiencia energética. Por otra parte, el reciente Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones Técnicas Complementarias EA-01 a EA-07 (R.D. 1890/2008) también regulan varios aspectos

que es necesario considerar en el diseño y los niveles de iluminación a implementar.

La regulación del nivel luminoso se puede realizar a través de sistemas de control que garantizan el ahorro de energía, reducen los costes de mantenimiento y mejoran la fiabilidad de los equipos.

Los equipos reductores - estabilizadores son aparatos que se instalan en el cuadro eléctrico y que permiten regular la intensidad lumínosa con consiguiente ahorro de energía; sus ventajas son (Rodríguez, J. M. y Rodríguez, J.; 2010):

- Aumento de la vida media de las lámparas.
- Compatibilidad con diferentes tipologías de lámparas.
- Continuidad en el funcionamiento.



**Foto 6.15.** Torre de iluminación móvil dotada de generador eléctrico y brazo extensible, en una cantera de caliza ornamental (Portugal) (Fuente: Atlas Copco, S.A.).



Señalización y balizamiento de una pista de transporte



Iluminación solar de una estación de carga

**Fotos 6.16 y 6.17.** Los sistemas de iluminación solar combinados con tecnología LED son una buena solución para emplazamientos en los que es complicado o muy costoso el suministro eléctrico. Ofrecen bajos costes de instalación y mantenimiento y ninguno de explotación. Además, las lámparas LED tienen mayor duración que las convencionales (más de 100.000 horas) y un consumo de energía mucho menor

(Fuente: Orion Solar Pty Ltd).

## Medidas de ahorro y eficiencia energética y buenas prácticas en la fabricación de áridos en la Comunidad de Madrid

Tal y como se ha señalado anteriormente, los diferentes procesos productivos en la fabricación de áridos, deben optimizarse desde el punto de vista de la reducción del consumo energético y por tanto de una disminución de los costes.

A partir de los ratios de consumo energético calculados para una determinada explotación y en comparación con el correspondiente índice de eficiencia energética (IE) según el tipo de roca y sistema de explotación empleado, es posible tomar las medidas necesarias para reducir el consumo y el coste de energía, aplicando las mejoras técnicas disponibles en conjunto con una serie de medidas de ahorro y buenas prácticas energéticas.

### 7.1. Ahorro de energía eléctrica

Las mejoras energéticas en relación a la energía eléctrica, se establecen desde dos vertientes:

- Fuente de energía.
- Elección adecuada de los motores.

El primer punto se logra mediante una optimización del contrato con la empresa eléctrica, complementado con una optimización de la instalación y maquinaria.

Para ello, se deberá:

- Estudiar el contrato eléctrico adaptándolo a la normativa vigente.

- ✿ Estudiar el factor de potencia (F.P.) de las instalaciones, así como la tarifa más conveniente y el suministrador.
- ✿ Optimizar la potencia eléctrica contratada, dimensionando el factor de potencia hasta un valor de 0,95, mediante la instalación en paralelo a la red de **baterías de condensadores** que aportan la potencia reactiva requerida localmente por los equipos.
- ✿ Controlar el desequilibrio entre fases.
- ✿ Elegir correctamente la potencia de los motores de forma que siempre trabajen entre el 75% y el 90% de su potencia nominal, ya que el rendimiento es máximo, cayendo bruscamente tanto cuando trabaja por encima o por debajo de estos valores.
- ✿ Seleccionar el motor de acuerdo con el ciclo de trabajo (continuo o intermitente).
- ✿ Regulación de la velocidad mediante convertidores de frecuencia.
- ✿ Instalación de **variadores de frecuencia** en los trituradores primarios, secundarios y terciarios.
- ✿ Sustitución de motores antiguos por motores de alta eficiencia energética.
- ✿ Desconexión de toda la instalación cuando cese la actividad.
- ✿ Realizar un buen mantenimiento predictivo de la instalación.
- ✿ Sustitución de sistemas de iluminación convencionales por otros más eficientes, mediante lámparas de bajo consumo.
- ✿ Evitar el trabajo en vacío de la instalación.

- Mantenimiento adecuado de la instalación.
- Comprobación de los sistemas de protección contra calentamiento y sobrecargas.
- Revisión periódica de los componentes del motor.
- Verificación periódica de la alineación del motor con el sistema arrastrado.
- Realización de auditorías energéticas.

## 7.2. Ahorro y eficiencia energética en el arranque con explosivos

En cuanto a la perforación y voladura, los objetivos serán:

- Diseño de forma que el todo uno producido se adecúe a las características de los equipos de carga y transporte y de la planta de trituración y clasificación.
- Empleo, siempre que las condiciones del terreno lo permitan, de martillo en cabeza.
- Optimizar el consumo de explosivo por tonelada producida de forma que el consumo energético de las operaciones subsiguientes: carga, transporte, trituración y clasificación, sea mínimo.
- Disminución de bolos, disminuyendo el taqueo mediante martillo en el tajo y evitando atascos y paradas en la planta.
- Cálculo de la fragmentación óptima.
- Empleo del diámetro más pequeño que proporcione la producción necesaria.

- Uso del Anfo como carga de columna, porque proporciona el coste €/kWh más bajo, siendo necesario el desagüe de los barrenos cuando exista la presencia de agua.
- Utilización de tapones en el retacado y empleo de material granular de cantera de tamaño 1/17D.

### 7.3. Ahorro y eficiencia energética en la carga y transporte

- Elección del tamaño de equipos acorde con la producción horaria, del tipo de material y de las condiciones y longitud de la pista de transporte; la combinación óptima está constituida por excavadora hidráulica volquete rígido.
- Empleo de sistemas continuos cuando sea posible, en función del tonelaje/hora y de la distancia y desnivel del transporte.
- Mejora en el diseño de pistas: anchura y pendiente y, fundamentalmente, de las características de la rodadura mediante un firme y un mantenimiento adecuados.
- Mantenimiento adecuado de los equipos:
  - Control del motor y comprobación de filtros de aceite de aire y de combustible.
  - Comprobación de la presión de los neumáticos.
- Realización de selección de material en el frente, evitando el transporte de estéril a la planta.

### 7.4. Ahorro y eficiencia energética en instalaciones de tratamiento

En las plantas de trituración y clasificación, las medidas de ahorro y eficiencia energética se establecen en torno a los siguientes aspectos:

- Transformación de circuitos abiertos de trituración secundaria y terciaria a circuitos cerrados.
- Realización de estudios de costes energéticos por tipos de productos obtenidos, eliminando o corrigiendo los más ineficientes.
- Utilización de separadores eficientes en los circuitos cerrados.
- Optimización de las trituradoras:
  - Diseño y estado de los forros.
  - Ajustes de carga y descarga.
  - Velocidad.
- Instalación de controladores de velocidad variable en las trituradoras.
- Instalación de controladores de velocidad variable en los ventiladores.
- Utilización de sistemas de transporte eficientes (elevadores de cangilones).
- Mejoras en la instrumentación y control, con sistemas de registro continuo.
- Instalación de stocks intermedios para asegurar flujos continuos y uniformes.

## 7.5. Mejoras energéticas de carácter general

- Realización del mantenimiento de toda la maquinaria según las indicaciones del fabricante.
- Moderar la intensidad de la luz en las zonas de menor necesidad y revisar continuamente los niveles de iluminación.
- Realizar una planificación estratégica por líneas de producto.

- Formación continua del personal.
- Realización de un control eficiente de todas las etapas de la producción.

## Las auditorías energéticas como instrumento de mejora

La auditoría energética para el sector industrial y minero, al igual que para el resto de sectores económicos, es una herramienta de importancia básica con vistas a conseguir objetivos de ahorro y eficiencia energética, constituyendo una de las acciones prioritarias fomentada en los vigentes planes de acción energéticos.

La auditoría energética es un sistema voluntario mediante el cual es posible analizar los flujos de energía de las empresas productivas, con vistas a detectar las debilidades que afectan al consumo y las oportunidades de ahorro de energía, para garantizar un uso eficiente y sostenible de la misma y evitar emisiones de gases de efecto invernadero. También facilita la toma de decisión en cuanto a inversiones en ahorro de energía, así como la rentabilidad y viabilidad de las mismas, y determina el *benchmarking* (o rendimiento del sistema) de los procesos productivos auditados.

El Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004–2012 ofrece la posibilidad, entre otras ayudas, de obtener subvenciones tanto al proceso de auditoría en sí, como a las inversiones en equipos que mejoren la eficiencia energética en las grandes empresas. En la actualidad las ayudas alcanzan el 50% de la inversión subvencionable para auditorías energéticas y entre un 20% y un 30% de los costes elegibles para la sustitución de instalaciones industriales, equipos, y transformadores de energía.

Se considerarán prioritarias las auditorías energéticas de todas aquellas industrias que tengan un consumo de energía final mayor de 4.000 tep/año.

El año 2009 se tramitaron 545 expedientes para el conjunto de las ayudas de que disponía la Comunidad de Madrid para ahorro y eficiencia energética.

Las auditorías energéticas de carácter interno tienen como mínimo dos tiempos de aplicación; uno inicial, con vistas a conocer la situación de partida de

la empresa auditada, y otro posterior o de seguimiento, que deberá corresponderse con el alcance, la finalidad y los objetivos de la auditoría inicial, y con la planificación, distribución de las operaciones a realizar orientadas al ahorro de energía. La periodicidad de estas auditoras de seguimiento dependerá de las condiciones del plan de ahorro establecido.

<b>Consumo Energía final (tep/año) por establecimiento</b>	<b>Valor máximo neto de ayuda (€)</b>
> 60.000	22.500
> 40.000 – 60.000	18.000
> 20.000 – 40.000	15.000
> 10.000 – 20.000	12.750
> 6.000 – 10.000	10.500
> 4.000 – 6.000	9.000
< 4.000	7.500

**Figura 8.1.** Cuantía de las subvenciones (Fuente: Guía de auditorías energéticas en el sector industrial de la Comunidad de Madrid).

Además, constituyen una etapa imprescindible dentro del proceso de implantación de un sistema de gestión de la energía de una empresa, cuyos requisitos se describen en la también reciente norma europea UNE EN 16001:2009.

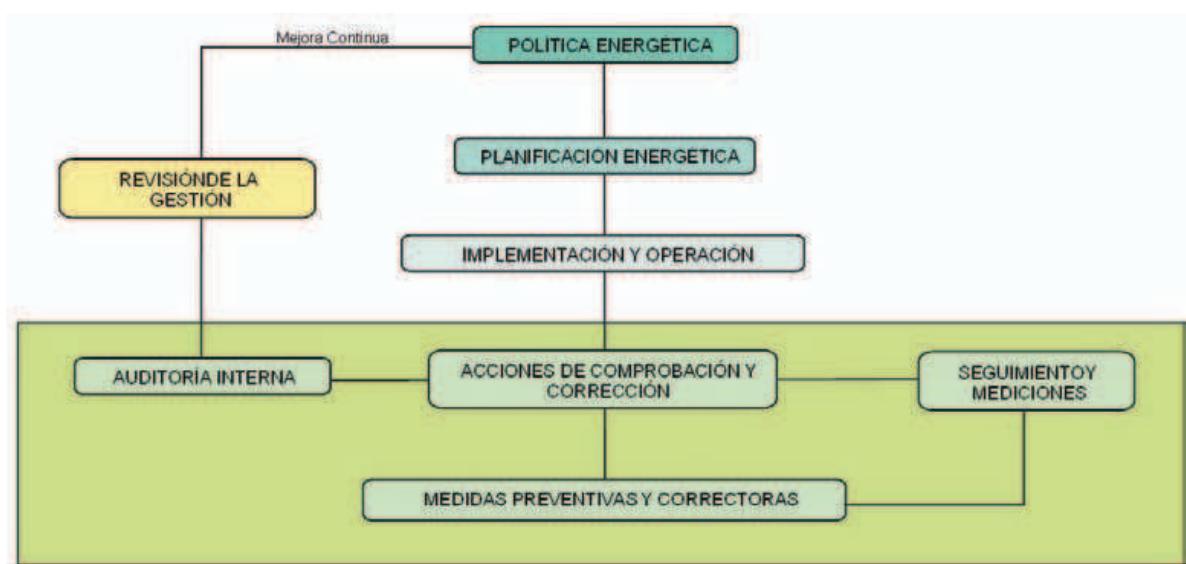
En este mismo sentido se debe señalar que la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) está preparando la ISO 50001 sobre gestión de la energía, estando prevista su presentación oficial para principios de 2011. En esta norma se establece un marco internacional para gestionar toda la energía de las plantas industriales, instalaciones comerciales u organizaciones, asegurando un alto nivel de compatibilidad con el resto de sistemas de gestión que pudieran estar implantados en las empresas: la norma ISO 9001 sobre gestión de calidad, e ISO 14001 sobre gestión medioambiental.

Los objetivos ordinarios de las auditorías energéticas son:

- ✿ **Conocer** la situación energética de la empresa en cada uno de sus áreas de trabajo, mediante la realización de encuestas, visitas y mediciones, básicamente.
- ✿ **Diagnosticar** sobre el estado de la actividad respecto al consumo de ener-

gía de los procesos productivos y más concretamente de los principales equipos consumidores de energía.

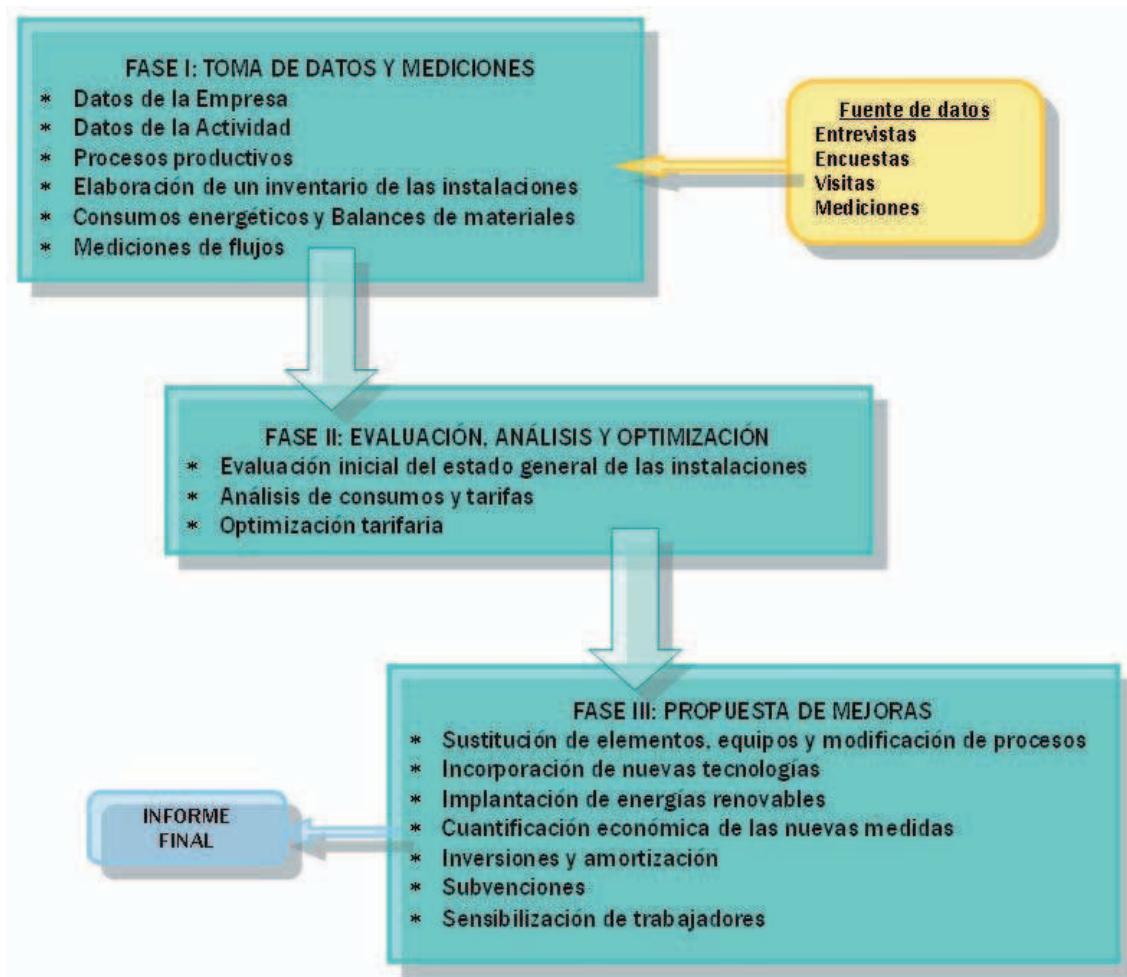
- **Detectar** los factores que afectan al consumo energético.
- **Proponer** mejoras en función de las distintas oportunidades de ahorro identificadas y evaluadas, tanto técnicas como económicas.



**Figura 8.2.** Modelo de gestión energética.

La mejor manera de lograr estos objetivos es establecer un protocolo de actuación en cada una de las áreas auditadas, y que, de manera general, en explotaciones mineras se pueden agrupar en consumo, electricidad, producción, mantenimiento, infraestructura general y transporte.

En principio, el proceso de auditoría consta de al menos tres fases: una primera de toma de datos, seguida de una evaluación de los consumos y análisis de la situación inicial de las instalaciones con vistas a proponer en una tercera fase, las posibilidades de mejora para una mayor eficiencia de sus equipos e instalaciones, Fig. 8.3. La Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, acaba de publicar la norma UNE-EN 216501:2009 en la que se establecen los requisitos que deben tener las auditorías energéticas para que, realizadas en distintas instalaciones y empresas industriales, puedan ser comparables.



**Figura 8.3.** Fases de una auditoría energética.

## Fase I: Toma de datos y mediciones

En esta primera fase es importante definir de manera previa los trabajos a desarrollar, con vistas a tener una visión lo más completa y realista posible de la empresa y sus actividades. Aunque la información se puede recabar de numerosas fuentes, las acciones durante esta primera etapa se podrían estructurar en los siguientes ítems:

- ✿ Encuesta previa. En el Apéndice de la Guía se anexa un modelo de formulario donde se exponen los principales aspectos que como mínimo es necesario conocer de una explotación minera: datos de la empresa, localización, producciones, consumos de electricidad, combustibles, explosivos, inventa-

rio y características de las instalaciones y de los equipos de la planta de beneficio, así como cualquier otro dato de interés para los objetivos de la auditoría.

- Visitas al conjunto de las instalaciones y entrevistas con los diferentes responsables de las áreas de extracción, producción, mantenimiento y gestión de la empresa, fundamentalmente.
- Realización de *mediciones in situ*, eléctricas, de gases de combustión y de confort climático, como luminosidad, temperatura y humedad.

## Fase II: Evaluación, análisis y optimización

Una vez recogida la información, el paso siguiente es evaluar y analizar el uso de la energía para identificar las oportunidades de ahorro (detección de fugas, mal uso de los equipos, mantenimiento, optimización tarifaria, etc.) y mejorar la eficiencia de las instalaciones.

En esta fase, los aspectos a estudiar se podrían agrupar de la siguiente manera:

- Evaluación inicial del estado general de las instalaciones. Detección de incidencias, fallos y fugas energéticas y localización de las mismas: sistemas de iluminación, de aislamiento, control de temperatura ambiental, etc.
- Revisión de los registros de consumos y elaboración de un análisis comparativo de los consumos anuales de energía en los dos-tres últimos años.
- Localización de los diferentes consumos parciales para determinar posibles desviaciones energéticas.
- Determinar si el mantenimiento es adecuado y considerar cómo podría mejorarse.
- Análisis del uso de la energía de producción.

- ✿ Control de las rutas de transporte, mantenimiento de los vehículos, estado de las pistas, etc.
- ✿ Revisión de facturas y contratos de suministro eléctrico.
- ✿ Optimización tarifaria y posibilidades de cambiar a otro tipo de tarifas (discriminación horaria, tarifas especiales de alta y baja tensión, bonificaciones, etc.). De esta manera, se pretende reducir el coste energético buscando la tarifa óptima en el nuevo mercado libre de la electricidad.

### FASE III: Propuestas de mejoras

Finalmente, como conclusión de la auditoría se redactará un *Informe Energético Final* en el que se deberán exponer las propuestas de mejoras energéticas derivadas del análisis anterior, cuantificando en la medida de lo posible el ahorro económico y ambiental derivado de las posibles medidas a adoptar, así como el orden de preferencia para su implantación.

En esta etapa se deben trabajar aspectos como:

- ✿ Los equipos y puntos con menor eficiencia y cuya corrección es más urgente.
- ✿ Propuestas de mejoras en las instalaciones para mejorar la eficiencia y reducir el gasto energético.
- ✿ Informes de análisis de rentabilidad financiera de las mejoras.
- ✿ Propuestas de implantación de energías renovables y cogeneración.
- ✿ Disminución de consumos.
- ✿ Valoración económica de las medidas adoptadas.
- ✿ Valoración de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> conseguidas.

- Planificación de las operaciones orientadas al ahorro de energía.
- Distribución de las operaciones a realizar y periodicidad de las mismas.
- Plan de mantenimiento de la Gestión Energética.

La auditoría energética concluye con la elaboración de un *plan para el ahorro y la eficiencia energética* de la empresa auditada, en el que además de medidas tecnológicas se deberán considerar cambios en comportamiento del uso de la energía. Con dicho plan se va a permitir alcanzar mayor productividad y calidad de producción, con menor coste ambiental.



## Bibliografía y directorio web de interés

- AEDIE, CÁMARA OFICIAL DE COMERCIO E INDUSTRIA DE MADRID Y COMUNIDAD DE MADRID (2003).: "Manual de auditorías energéticas".
- ANEFA Y AFA (2010).: "Mejora de la Gestión Energética en las cantera y graveras de La Rioja". Gobierno de La Rioja. Turismo, Medio Ambiente y Política Territorial. Dirección General de Política Territorial.
- BARREIRA PAZOS, C. (2010).: "Eficiencia Energética en la Producción de Áridos: Variadores de Velocidad y Motores Eficientes". EnergyLab. Jornadas sobre Eficiencia Energética en el Sector de los Áridos. Febrero 2010.
- COMUNIDAD DE MADRID (2000).: "Manual de gestión ambiental y auditoría. Sector de la minería a cielo abierto". Consejería de Medio Ambiente.
- COMUNIDAD DE MADRID (2009).: "Procedimiento de auditorías energéticas en el sector industrial de la Comunidad de Madrid". Dirección General de Industria, Energía y Minas y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid..
- COMUNIDAD DE MADRID (2006).: "Guía de Ahorro Energético en Instalaciones Industriales". Dirección General de Industria, Energía y Minas y Fundación de la Energía.
- DE FRANCISCO, D. y POZO D. (2010).: "PROFenergy, ahorro de energía durante las pausas de producción". SIEMENS. I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- DIRECTIVA 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo.
- ELORANTA, J. (1997).: "The Efficiency of Blasting Versus Crushing and Grinding". The Journal of Explosives Engineering.

- ELORANTA, J. (2004).: "Improving Cost Efficiency and Aggregate Quality in Crushing Plants".
- ELORANTA, J. (2006).: "Minimizing Quarrying Costs by Correct Shotrock Fragmentation and In-Pit Crushing". METSO MINERALS.
- ELORANTA, J. (2006).: "Comparison of Different Shot Rock Fragmentation".
- FERNÁNDEZ ALLER, R. (Ed.) (1992).: "I Primeras Jornadas Técnicas sobre áridos".
- GÓMEZ DE LAS HERAS, J., LÓPEZ JIMENO, C. et al. ITGE (1991).: "Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto".
- HERNÁNDEZ, S. (2010).: "Control de iluminación en el Sector Industrial". SIEMENS. I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- IDAE 2<sup>a</sup> Ed. (2007).: "Guía práctica de la energía. Consumo eficiente y responsable".
- IDAE (2007).: "PLAN DE ACCIÓN 2008 – 2012".
- IGME (1995). "Libro Blanco de la Minería de la Comunidad de Madrid". Consejería de Economía. Comunidad de Madrid.
- LÓPEZ JIMENO, C. (Ed.) (1995).: "Manual de Áridos". E.T.S.I. Minas - UPM.
- LÓPEZ JIMENO, C., LÓPEZ JIMENO, E. y GARCÍA BERMÚDEZ, P. (2003).: "Manual de Perforación y Voladura de Rocas". E.T.S.I. Minas - UPM.
- LÓPEZ JIMENO, C. (2010).: "La eficiencia energética en explotaciones de áridos". Cátedra ANEFA
- LUACES FRADES, C. (2010).: "Eficiencia energética. Estado de la situación del sector de los áridos".

- METSO (2008).: "Manual de Trituración y Cribado". Catálogo N° 2051-12-08-CBL/Tampere-Español.
- MINISTERIO DE ECONOMÍA (2003).: "Estrategia española de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012". Secretaría de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la pequeña y mediana empresa.
- MIRO (2008).: "Optimising the efficiency of primary aggregate production. Theme 2 – Sustainable provision of aggregates".
- MONTES, P. (2010).: "Las Baterías de Condensadores, un verdadero instrumento para la eficiencia energética. Caso práctico". I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- MORILLO, A. et al. (2010).: "Motores Eléctricos. Motor Eléctrico de Alta Eficiencia Energética". I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- NÚÑEZ-BARRANCO P. y MARTÍNEZ VÁZQUEZ J. (2010).: "La corrección del Factor de Potencia como primer paso hacia el Ahorro y la Eficiencia Energética". I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- PROGRAMA DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES EN ENERGÍA (PRIEN) (2003).: "Estudio de las Relaciones entre la Eficiencia Energética y el Desarrollo Económico". Preparado para la Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica (GTZ). Universidad de Chile.
- RODRIGO, J. y LÓPEZ, A. (2010).: "Iluminación Industrial Eficiente". I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- RODRÍGUEZ, J. M. y RODRÍGUEZ, J. (2010).: "Reductores de flujo luminoso y estabilizadores de tensión de alto rendimiento para instalaciones de alumbrado exterior". I CONGRESO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ELÉCTRICA – E3PLUS. Dirección General de Industria, Energía y Minas, y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.

- VAN LEUVEN, G. et al. (2010).: "Estudio teórico y experimental sobre la eficiencia energética de las soplantes de tornillo en comparación con las soplantes de lóbulos rotativos". Atlas Copco, S.A. Canteras y Explotaciones N° 527, 2010, págs. 14-24.
- WORKMAN, L. (2003).: "The potential for unifying drilling, blasting and downstream operations by the application of technology".
- WORKMAN, L. and ELORANTA, J. (2003).: "The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption". Complete Abstracts of the ISEE Proceedings. 2003 Volume I General Proceedings Collection.
- ZIMMERMANN, E. and KRUSE, W. (2006).: "Mobile crushing and conveying in quarries – a chance for better and cheaper production". ISCSM. Aachen.
- <http://www.energiasrenovables.ciemat.es>
- <http://www.fenercom.com>
- <http://www.metso.com>
- <http://www.mityc.es/energia/mineria/Estadistica>
- <http://www.isee.org>

# Apéndice

## CUESTIONARIO SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO EN LAS EXPLORACIONES MINERAS

### DATOS DE LA EXPLORACIÓN

EMPRESA			
NOMBRE	SECCIÓN		
TIPO DE EXPLORACIÓN	Cantera <input type="checkbox"/> Sí	Gravera <input type="checkbox"/> Sí	
PLANTA DE TRATAMIENTO			

### LOCALIZACIÓN

TÉRMINO MUNICIPAL			
PARAJE			
COORDENADAS	X:	Y:	

### PRODUCCIÓN

RECURSO EXPLOTADO			
DENSIDAD (t/m <sup>3</sup> )	Año 2007	Año 2008	Año 2009
PRODUCCIÓN BRUTA (t/año)			
PRODUCCIÓN VENDIBLE (t/año)			
PRODUCTIVIDAD (t/día)			

### CONSUMOS ANUALES

	Año 2007	Año 2008	Año 2009
ENERGÍA ELECTRICA (kWh)			
COMBUSTIBLES:			
GASOIL (l)			
FUELOIL (l)			
EXPLOSIVOS TOTAL(kg)			
CARGA DE FONDO DINAMITA O HIDROGELES (kg)			
CARGA DE COLUMNA (kg) ANFO			

Página 1

**PERFORACIÓN Y VOLADURA**

MARCA Y MODELO PERFORADORA	POTENCIA (kW)
MARTILLO EN CABEZA (MODELO)	MARTILLO EN FONDO (MODELO)
ALTURA DE BANCO (m)	
DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (mm)	
LONGITUD DE PERFORACION (m)	
Nº DE BARRENOS ANUAL	
METROS DE PERFORACIÓN ANUALES	
METROS /HORA	
PIEDRA (m)	
ESPACIAMIENTO (m)	
CARGA DE FONDO BARRENO (kg)	
CARGA DE COLUMNA BARRENO (kg)	
RETACADO (m)	

**CARGA Y TRANSPORTE**

DISTANCIA RECORRIDADA (m) (ida + vuelta)	MARCA Y MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)
PENDIENTE MEDIA(%)			
MÁQUINA DE CARGA			
EXCAVADORAS HIDRÁULICAS			
PALAS DE RUEDAS			
CAMIONES			
RÍGIDOS			
ARTICULADOS			
CONVENCIONALES			
OTRAS MÁQUINAS			
MOTONIVELADORAS			
MIXTAS			

**MANIPULACIÓN Y CARGA EN PLANTA**

MÁQUINA DE CARGA	MARCA Y MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)
CAMIONES			
OTRAS MÁQUINAS			

**INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

	POTENCIA (kVA)

Página 2

PLANTA DE TRATAMIENTO				
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	TIPO/ MARCA MODELO/REGULACIÓN (mm)	NÚMERO	POTENCIA UNITARIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
PRIMARIA				
SECUNDARIA				
TERCIARIA				
ALIMENTADORES	TIPO/ MARCA MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)	
CRIBAS	MARCA MODELO	Nº BANDEJAS	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	
CINTAS	LONGITUD (m)/ANCHURA (mm)/ VELOCIDAD (m/s)	NÚMERO	POTENCIA (kW)	
LAVADO	MARCA MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)	
TROMMEL				
NORIA				
CICLONES				
ESCURRIDOR				
BOMBAS				
TRATAMIENTO DE AGUAS	MARCA MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)	
DECANTADOR				
LAMELAS				
FILTROS PRENSA				
BOMBAS				
OTRAS INSTALACIONES	MARCA MODELO	NÚMERO	POTENCIA (kW)	

