

## EL PROTAGONISMO DE LA ENERGÍA EN LA CLASIFICACIÓN AMBIENTAL DE LOS PROYECTOS DE MINERALES DE HIERRO

Luis de la Torre Palacios

Ingeniero de Minas, ETSIMM. Email: lutorpac@yahoo.es

Dependiendo del empleo al que se destine el mineral de hierro (horno alto, reducción directa, cemento, etc.), se perseguirán minerales con diferentes características, bien en contenidos (P,  $Mn_2O_3$ , MnO, S, P,  $SiO_2$ ), bien como en tamaño final del mineral, o bien por su ley en hierro. Asimismo, dependiendo del mineral encontrado en la naturaleza, el tratamiento del mismo se efectuará en función igualmente de sus características, por ejemplo su friabilidad y dureza, así como por su posterior necesidad de uso.

Para el estudio del proceso de la minería del hierro desde el punto de vista de su consumo energético, se deberían analizar tres etapas principales: la conminución, el transporte y su tratamiento y aglomeración.

El transporte, se puede considerar independiente del tipo de mineral, sin entrar en detalles, y tendría en cuenta un aspecto de importante en el terreno ambiental, tal como es el movimiento másico. Sin embargo, en la conminución y la concentración, se debe tener presente el tipo de mineral y sus necesidades, al igual que en la aglomeración, que vendrá marcada por sus condicionantes del empleo posterior.

Entre las fuentes de materias primas más habituales en la fabricación del hierro, se encuentran: la magnetita con sus propiedades magnéticas; la hematites, como el más abundante, presentándose bien en masas coherentes, bien como mineral suelto y, también, la goetita y la limonita como óxidos hidratados.

### FASE DE INVENTARIO

Las etapas características por consumo energético en la minería del hierro son las siguientes:

Primera etapa: la voladura. En las clasificaciones de conminución (i.e. Hukki), se comienza con el arranque por explosivo, referido habitualmente a una reducción en tamaño hasta elementos de menos de 1 metro, sin tener en cuenta la influencia de los diferentes tipos de mineral.

OPERACIÓN	Alimentación cm	Tamaño final cm	Energía consumida kWh/t
Explosivos	∞	40	0,24

El transporte. Una vez realizada convenientemente la voladura, y tras un ligero tamizado, las palas cargadoras, las excavadores y otra maquinaria de apoyo, trasladarán el material a los volquetes de mina, de diverso tonelaje, en función de la capacidad de producción del yacimiento explotado.

Se podría clasificar el consumo energético en el transporte en tres categorías, en función del peso movilizado por viaje. Esto es, una primera división de hasta 100 toneladas, una segunda de 100-200 toneladas y una superior de hasta 400 toneladas. Se presentan unos valores ejemplo en la tabla siguiente.

MÁQUINA	Marca	Modelo	Capacidad (t)	Peso (t)	Consumo (l/h)	Comb	Velocidad (Km/h)	Energía (MJ / h)
Volquete	Caterpillar	777c	100	150	90	diesel	64	3.479
Volquete	Komatsu	1.200	140	240	120	diesel	65	4.638
Volquete	Caterpillar	797f	370	625	200	diesel	67	7.730

Considerando 7.248 horas de trabajo al año, en un año supondría un consumo de energía de 56.000 GJ para los de 370 t de capacidad, transportando más de 2.5 Mt en un año. Para el cálculo de la energía, se considera que el gasoil posee una energía específica de 38,65 MJ/l. En el caso de volquetes de 100 t, el consumo sería de 25.200 GJ, transportando 870.000 t al año

MÁQUINA	Marca	Modelo	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Peso (t)	Consumo (l/h)	Combustible	Energía (MJ/h)
Bulldozer	Caterpillar	D10	24	-	75	diesel	2.899
Retroexcavadora	Hitachi	1800	12	180	100	diesel	3.865
Pala cargadora	Caterpillar	992c	11.2	85	105	diesel	4.058

Analizando los datos del “Profile of the US Mining Industry”, podemos observar, que en una explotación media de 5 Mt/a, y con un transporte de menos de 500 m al centro de beneficio, el consumo de energía en el transporte viene a ser del 30% del empleado en la mina, teniendo en cuenta también la carga con palas frontales y excavadoras, que en este caso alcanzarían el 50%.

MAQUINA	MJ/t	%
Pala cargadora	23,9	27%
Volquete	24,5	28%
Excavadora	20,2	23%
Camión servicio	0,8	1%
Camión gruesos	0,8	1%
Perforadoras	6,1	7%
Palas hidráulicas	5,8	7%
Camionetas	2,6	3%
Aguadores	1,3	1%
Bombas	0,9	1%

[Western Mining Engineering 2002]

Para casos de distancias elevadas, la solución se convierte en el uso de ferrocarril o incluso el menos utilizado transporte por tubería, hasta la planta de filtración o el buque de carga.

Los datos anteriores se encuentran, de una manera más general, y referidos a un yacimiento de mineral de hierro hipotético, en el cuadro siguiente [“Michigan Technology University”], en dónde se incluye el consumo de energía por tonelada extraída de mineral.

PROCESO	MJ/t	%
Perforación	1,80	3%
Voladura	3,06	4%
Carga	6,66	9%
Transporte	53,66	75%
Otros	6,84	9%
<b>TOTAL</b>	<b>72,02</b>	<b>100%</b>

El beneficio del mineral: En su extracción, el mineral de hierro viene acompañado de su correspondiente ganga, y se considerará económicamente explotable cuando la concentración en hierro sea como mínimo de un 30% Fe. Se tendrá en cuenta de igual manera la friabilidad del mineral según el yacimiento estudiado. Son tres las posibilidades para el producto de mina:

- El transporte directo, posterior al cribado grueso y cierto machaqueo hasta 20-30 mm, o bien finos para sinter de 6-10 mm. Suele ser magnetita, hematites o goetita.
- Concentrado, donde se eliminan las impurezas que acompañan al hierro (P, Na, K, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> o Ti) o se mantienen las que se consideran de mayor valor posterior en la obtención del acero (Ca, Mn), mejorando la ley final.
- Aglomerado en forma de pellets o briqueteado.

El beneficio comprende las siguientes etapas:

1. La **conminución**: ésta tratará de obtener una reducción de las rocas transportadas desde mina hasta tamaños de más fácil manejo para su transporte último o para su posterior tratamiento. En el mineral de hierro, se tritura hasta lograr un tamaño cercano a los 6 mm (salvo casos especiales como la magnetita que exige una molienda fina a fin de poder aprovechar sus propiedades magnéticas). Esto engloba una trituración primaria (hasta 100 mm) y una posterior trituración secundaria (hasta 10 mm), e igual una molienda gruesa. En la etapa de conminución siguiente, la trituración o machaqueo resulta una actividad intensiva en consumo de energía y de muy baja eficiencia energética, con una gran cantidad de energía disipada en forma de calor, lo que obligará a un análisis para evaluar el coste-beneficio de esas reducciones posteriores.

Centrándonos en el consumo energético, se continúa empleando la ecuación de Bond para los cálculos de trabajo necesario según los tamaños deseados y el tipo de material. Aplicando sus fórmulas obtendríamos:  $W = 10W_i (1/P^{0.5} - 1/F^{0.5})$ , donde: W = trabajo consumido [kWh/t],  $W_i$  = índice de Bond, según el tipo de roca [kWh/t], P = 80% de paso de producto final y F = 80% de paso de roca alimentación.

Como ejemplo orientativo, se puede considerar un yacimiento de taconita, donde ésta es volada con “heavy ANFO” con 3,35 MJ/Kg (801 cal/g). Se mide el tamaño del 80% de paso del material tras la voladura, resultando de 40 cm. La roca pasa por dos etapas de trituración y una molienda. El producto final pasa el 80% una malla de 270.

En la tabla siguiente, se muestran lo mínimos en la energía necesaria y su coste (el explosivo se considera 0,33 kg/t y un coste de 0,264 \$/kg; coste energía 0.07 kWh).

OPERACIÓN	Alimentación	Tamaño final	Energía consumida			Coste Energía
	cm	cm	MJ/t	kWh/t	%	\$/t
<b>Explosivos</b>	∞	40	0,86	0,24	1	0,087
<b>Trituración 1<sup>ia</sup></b>	40	10,2	0,83	0,23	1	0,016
<b>Trituración 2<sup>ia</sup></b>	10,2	1,91	2,20	0,61	3	0,043
<b>Molienda gruesa</b>	1,91	0,0053	69,66	19,35	95	1,35
<b>TOTAL</b>			<b>73,55</b>	<b>20,43</b>	100	<b>1,50</b>

El índice de Bond resulta obviamente diferente para los diversos minerales de hierro, así encontramos un valor de 12,84 para la hematites, 13,84 la hematite especular, oolítica 11,33, magnetita 9,97 y 14,61 la taconita, resultando una diferencia máxima de un 30%, lo que nos podría obligar a tener en cuenta el efecto de los diferentes tipos de mineral de hierro a la hora de calcular su consumo energético en la molienda.

Sin embargo, y en la línea de lograr trabajar con un indicador práctico y rápido, para la trituración primaria se calculará un consumo de 0,2 – 0,5 kWh/t y en la secundaria de 0.5 – 2 kWh/t (“Principles of extractive Metallurgy, 2004, de Terkel Rosenqvist”). De aquí que a partir de ahora tomaremos como media de consumo en la etapa de conminución: 2,5 kWh/t o 9 MJ/t, donde se considerarían incluidos, al elegir los valores máximos, los 0,24 kWh/t calculados por los explosivos. [“*The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption Lyall Workman1 and Jack Eloranta2*”].

A la luz de lo anterior, se podría hacer a grosso modo, una primera agrupación entre los minerales de hierro en función de las necesidades en el beneficio del mineral. Se podría hablar así de dos grupos:

- G1: La hematites y la goetita, caracterizados como los óptimos minerales de hierro para los fines requeridos (logran un concentrado de hasta un 66% Fe, con rendimiento del 62-86%).
- G2: La taconita y la magnetita. Su molienda requiere gran cantidad de energía a causa de la intensiva molienda necesaria para la liberación de las partículas. Las magnetitas, facilidad de separación con separadores magnéticos tras una molienda previa, siendo un mineral duro y presentando una riqueza baja en hierro, 25-50% Fe.

Con ciertas especies del G2 –i.e. la taconita, de gran dureza que aparece como magnetita y hematita finamente dispersa con sílice en depósitos sedimentarios-, puede ser necesaria la molienda con barras, bolas o autógena, alcanzando una finura de 45-25 micras, a fin de facilitar la liberación del hierro del resto de minerales de la ganga. Lo mismo ocurre con la magnetita y su necesidad de molienda para poder aprovechar sus propiedades magnéticas en la separación. Por tanto, podemos considerar esos 70 MJ/t en la molienda de

estos minerales, sin embargo con el G1 - hematites y goetita-, no serían necesarios esa cantidad de energía adicional.

2. **Concentración:** los dos métodos más utilizados en la concentración en la mineralurgia del hierro son los siguientes: la flotación, la separación magnética, la separación gravimétrica (espirales) y el filtrado. Suponemos un consumo cercano a 1 kWh/t.

3. **Aglomeración:** se dan dos métodos principales de aglomeración para lograr las características necesarias para su posterior utilización en el horno alto, siendo:

- Sinterizado: por tonelada de sinter se consumen 57-200 MJ de gas, 1260-1380 MJ de coque y 96-114 MJ de electricidad, resultando un total de 1.694 MJ/t
- Peletizado: por tonelada de pellet se consumen 600 MJ de gas, 283 MJ de coque, 51-128 MJ de electricidad, 213-269 MJ de carbón, resultando un total de 1.280 MJ/t.

## RESULTADOS

Por tanto, con el análisis realizado se obtienen los siguientes resultados:

Grupo	Arranque y transporte	Conminución	Aglomerado	TOTAL	Uds
G1	72	10	-	82	MJ/t
G2	72	73,55	1.500	1.645	MJ/t

Para los minerales correspondientes al grupo G2, resulta que su consumo de energía eléctrica es de un 12% del proceso total, al incluir la fase de aglomerado. O bien, 73 MJ/t por la molienda y más 128 MJ/t de la aglomeración, que suponen 201 MJ/t.

Así pues, se puede entender la importancia del consumo energético en la conminución y aglomerado, de igual manera que se tiene también que observar el gran consumo originado por el movimiento másico, característica principal de este tipo de minería de hierro.

Para el movimiento másico, se deberá investigar cuáles son los principales hitos en el transporte del mineral –bien como transformado o bien como lump- desde bocamina hasta su destino final en mercado. Los tipos de transporte habituales del mineral, serán los necesarios una vez realizada la voladura o el arranque, iniciándose en la carga y transporte en volquete hasta el ferrocarril que cargará con el mineral desde las cercanías de la mina, hasta el puerto más cercano de suficiente cabotaje.

El transporte por mar hasta el puerto de compra, dependerá lógicamente de las distancias a recorrer para alcanzar los mercados previamente contratados. El transporte anual de mineral de hierro supera los 700 Mt, desde los puertos de Brasil y Australia principalmente, hasta los de China, Unión Europea, Japón y Corea del Norte.

Teniendo en cuenta los millones de toneladas a beneficiar para lograr la explotación rentable de este tipo de yacimientos, resultará igualmente interesante conocer el mix energético del país explotado. Tras el análisis de la composición de las fuentes energéticas de los principales países productores, se mostrará, por ejemplo, cómo no resultará lo mismo la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido en Suecia, que en China, ya que sus fuentes de energías varían abismalmente.

## CONCLUSIÓN

Todos estos datos tras el pertinente desarrollo, permitirán englobar las diferentes explotaciones de hierro según una clasificación ambiental. Se concluye cómo resulta de sensible para el consumo energético, el empleo de unos u otros tipos de yacimientos de este mineral según sus propiedades (magnetismo, dureza, friabilidad, contenido en hierro), permitiendo integrarlos en un análisis de energía o englobarlos en un sistema de gestión de energía.