

¿Transporte o transmisión?

¿Debemos transportar los recursos de energía primarios, o transmitirlos en forma de electricidad?

Alexandre Oudalov, Muhamad Reza

Cuando pensamos en los métodos mediante los que el combustible primario que se encuentra en minas y yacimientos se transforma en la electricidad que hace que funcione nuestro alumbrado, solemos considerar los diversos pasos del proceso de extracción y transformación. Pero la optimización de este proceso es incompleta si no se tiene en cuenta otro aspecto: el transporte.

¿Se deben construir las centrales cerca de los centros de carga, llevando allí el combustible de forma mecánica (por ejemplo, por ferrocarril, barco o tubería), o es más práctico producir la electricidad cerca de los yacimientos de energía primaria y utilizar el tendido eléctrico para la transmisión masiva de la electricidad?

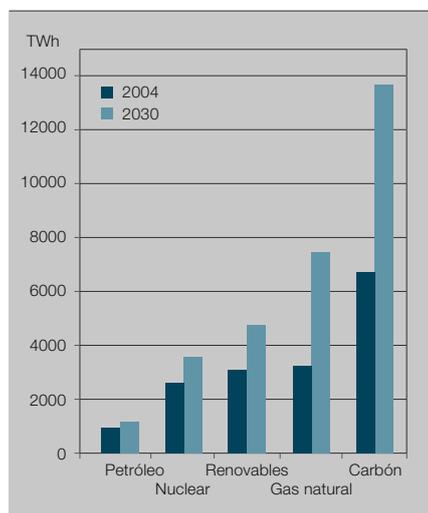
Los estudios de la Agencia Internacional de la Energía indican que la demanda global de energía eléctrica se duplicará de aquí al 2030. El carbón y el gas natural constituirán las fuentes mundiales de energía eléctrica que más crecerán, y acumularán alrededor del 70% del aumento de la producción de electricidad los próximos 30 años ¹. Puesto que las fuentes de energía primaria suelen estar lejos de los centros de carga y de población, su explotación suele requerir la transmisión masiva de energía eléctrica (>500 MW) o el transporte equivalente de recursos de energía primaria a lo largo de grandes distancias (>100 km). El Cuadro 1 recoge distintos supuestos de transporte. Corresponden a distintos grados de eficacia, fiabilidad y seguridad ambiental. Estos supuestos se caracterizan por el tipo de recurso energético primario utilizado y por el

sistema de transporte utilizado. Los métodos adoptados para trasladar los recursos energéticos primarios a las centrales y para trasladar la energía eléctrica a los centros de carga se determinan mediante un proceso de decisión complicado y dependen (entre otros factores) de la cantidad de energía que hay que trasladar, la distancia que debe recorrerse, los costes de capital y de explotación del sistema de transporte y la infraestructura existente [1-3]. Infiere también el coste de la externalización, vinculado con las consecuencias ambientales y sociales del transporte de la energía. Aquí se analiza la posición de las tecnologías por "cable" de ABB (HVDC y HVAC) con respecto a diversos métodos de transporte de la energía primaria y la generación de la electricidad cerca de los centros de carga.

Modelo de transporte masivo de energía

Se elaboró un modelo de transporte masivo de energía (BET) con todas las combinaciones relevantes de supuestos y tecnologías, teniendo en cuenta las técnicas habituales de análisis del coste del ciclo de vida con valoración económica de las externalidades y análisis de sensibilidad. En 2 se ilustran los componentes principales del modelo BET para comparar distintas opciones de transporte de energía (más detalles en [4]). El análisis del transporte masivo considera la transmisión de energía eléctrica y el transporte de recursos energéticos primarios. El coste de cada opción de transporte se compone de costes de capital, de explotación y de externalidad

1 Generación de electricidad mundial por combustible, 2004-2030, Fuente: AIE, 2006



Cuadro 2. Junto con el coste de la electricidad en el punto de suministro al centro de carga, estos índices se utilizan para clasificar las opciones de transporte.

Efecto sobre la contaminación atmosférica

Veremos aquí una estimación de los costes externalizados con un ejemplo de contaminación atmosférica. La contaminación del aire por la producción y el transporte de energía incluye los contaminantes emitidos por la combustión de recursos energéticos primarios en la central y por los motores del material móvil, más los liberados por la combustión de los recursos energéticos primarios añadidos necesarios para cubrir las pérdidas por transmisión. En el estudio se consideraron el CO₂ para el cambio climático general, el NO_x y SO₂ para la lluvia ácida, y los aerosoles y partículas en suspensión (PM), además de las distintas posibilidades de captura de las emisiones al aire de las centrales y el

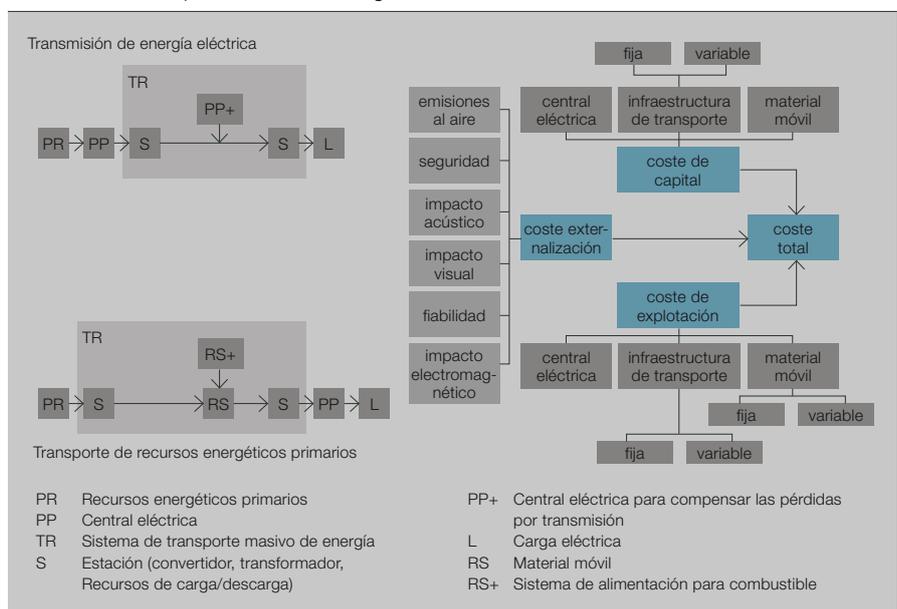
material móvil. El coste de la externalización es un indicador aislado que agrupa los costes de las emisiones a la atmósfera de todos los contaminantes de la opción de que se trate.

Por ejemplo, el coste anual de la externalización de las emisiones de CO₂ en el caso de la transmisión de electricidad combinada con la generación por combustión de carbón en bocamina se calcula a partir de:

- El factor de emisión en toneladas de CO₂ por tonelada de carbón quemado.
- La eficacia de la reducción de las emisiones de CO₂ de la planta de carbón (influye en los costes de capital y explotación). El consumo de carbón en toneladas por año.
- La estimación de los impuestos futuros sobre emisiones por tonelada de CO₂.

Los impuestos por emisiones al aire suelen reflejar los efectos sanitarios y ambientales de los contaminantes gravados.

2 Modelo de transporte masivo de energía



Cuadro 1 Distintos supuestos de transporte masivo de energía

Recurso energético primario	Traslado del combustible por						
	Cable	Ferrocarril	Gabarra	Barco	Tubería	Camión	Cinta
Carbón	HVAC HVDC	Tren	Remolque	Barco	Pasta, pastillas de carbón, gas sintético	No es práctico para >100 km	No es práctico para >50 km
Gas natural		No es práctico		Barco GNL	Aérea, subterránea	No es práctico	Físicamente imposible

Transformadores y subestaciones

Cuadro 2 Componentes del modelo BET: costes de capital, explotación y externalización.

Modelo	Central eléctrica	Infraestructura de transporte		Material móvil	
		Fija	Variable	Fijo	Variable
El coste de capital está ligado a la producción, la construcción y el desmantelamiento de la infraestructura.	Capacidad de la central eléctrica. Varía para cada supuesto de transporte de energía debido a las características y a la energía añadida necesaria para compensar las pérdidas por transmisión.	Instalaciones de carga o descarga de recursos energéticos primarios o estaciones de convertidor y transformador en ambos extremos de la ruta.	Ruta de transporte: tendido de la vía, del tubo, del cable o de la línea aérea de alta tensión	Material móvil: trenes, remolques, barcos	
El coste de explotación está ligado a la producción y transporte de los recursos energéticos primarios, la producción y la transmisión de electricidad y la compensación de las pérdidas.	Coste de combustible y mantenimiento	Pérdidas eléctricas en las estaciones de convertidor y transformador o recursos energéticos primarios perdidos durante la carga o descarga del material móvil más coste de mantenimiento	Pérdidas eléctricas en los conductores o recursos energéticos primarios perdidos durante el transporte más coste de mantenimiento	Coste de mantenimiento	Coste de combustible
<p>El coste externalizado está relacionado con las consecuencias ambientales y sociales del transporte masivo de energía. Si las disposiciones ambientales excluyen todas las externalidades, estos costes serán nulos. Pero para la normativa medioambiental no es eficaz eliminar todas las externalidades. Por el contrario, se debe fijar una norma en la que el beneficio social marginal de la reducción iguale al coste social marginal. En ese punto todavía habrá externalidades que habrá que considerar en las decisiones sobre el transporte. Incluso suponiendo que la normativa medioambiental esté correctamente definida, las demás externalidades pueden influir en la elección de una opción para el BET en vez de otra; por ejemplo, un cable subterráneo para la transmisión en lugar de un tendido aéreo. En el modelo BET, las emisiones contaminantes del aire, la seguridad, el ruido acústico, el efecto visual (estética) y el impacto de EMF se consideran componentes del coste externalizado.</p>					

En la actualidad alcanzan los 25-40 dólares por tonelada de CO₂ en algunos países [5]. Teniendo en cuenta que las emisiones de CO₂ tienen un efecto medioambiental global, el impuesto por emisiones no depende de la situación geográfica de la central eléctrica ni de la infraestructura de transporte de energía dentro de un área de reglamentación ambiental dada. Sin embargo, los otros contaminantes considerados tienen un importante efecto ambiental local. Así pues, las centrales y las infraestructuras para el transporte de energía situadas cerca de los centros de carga están sujetas a impuestos por emisiones mucho mayores que las correspondientes a zonas aisladas.

Estudio de un caso

Aquí se presenta el resultado de un análisis comparativo de un conjunto de

supuestos de transporte de energía definidos de acuerdo con las últimas tecnologías y el uso típico en el territorio continental. Estos supuestos corresponden al transporte de energía desde una mina de carbón (carbón subbituminoso pobre en azufre) al centro de carga con los medios siguientes **3**:

- Carbón por cable (tendidos aéreos HVAC y HVDC y cable VDC) conectados a una central eléctrica de carbón en bocamina.
- Carbón por ferrocarril combinado con una central eléctrica de combustión de carbón próxima al centro de carga.
- Carbón a gas natural sintético (metanización) por gasoducto combinado con una central de combustión de gas próxima al centro de carga.

Este estudio se basa en el supuesto del transporte de 1.000 MW de electricidad

(o del envío de los recursos energéticos primarios necesarios para producir 1.000 MW) a una distancia de 1.000 km. En esta primera fase del análisis se supone que:

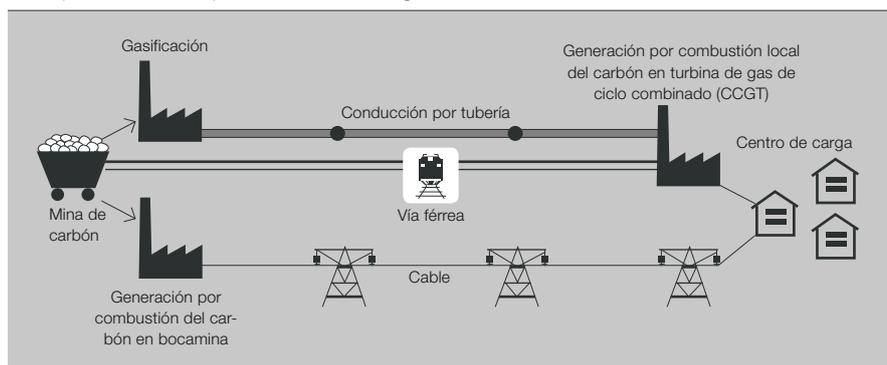
- Los costes externalizados no están incluidos en el caso de la práctica habitual (BAU).
- Se conocen todos los datos necesarios de costes de capital y explotación.
- No hay tendidos de ferrocarril, línea de transporte de electricidad ni gasoducto, sino que hay que construirlos.

En **4** se ilustra el coste de la electricidad en el centro de carga, incluyendo la generación y el transporte de la energía. Al comparar los distintos supuestos de transporte masivo de energía en el caso BAU se deduce que:

- Su clasificación depende principalmente del coste de capital.
- Los tendidos aéreos HVDC ofrecen el coste más bajo para la electricidad.
- El coste de explotación es el principal componente de la opción de carbón por ferrocarril.
- El cable HVDC subterráneo es la opción más costosa.

El caso BAU demostró que la transmisión por tendido aéreo HVDC es más ventajosa que el transporte de recursos energéticos primarios al centro de carga y producción local de la energía eléctrica.

3 Supuestos de transporte masivo de energía



A continuación se tuvieron en cuenta los costes externalizados (en particular las emisiones de CO₂) para clasificar las diversas opciones de transporte. En 5 se ilustra la variación del coste de la electricidad en el centro de carga según la variación del impuesto sobre emisiones de CO₂ en un supuesto sin captura del CO₂. El extremo izquierdo corresponde al supuesto de impuesto nulo (idéntico al caso BAU). A partir de ahí, el coste de la electricidad aumenta con el impuesto sobre el CO₂ para todas las opciones. El cable HVDC subterráneo presenta el coste más alto debido a la mayor cantidad de carbón que hay que quemar para compensar las pérdidas en el transporte de electricidad. Un tendido aéreo HVDC es la opción más barata con un impuesto inferior a 100 dólares por tonelada de CO₂, pero puede ser superada por la opción de transformación de carbón a gas con conducción por gasoducto cuando se alcanza el “punto de equilibrio del impuesto sobre emisiones de CO₂” de 100 dólares por tonelada de CO₂. La opción de carbón por ferrocarril es más económica que el tendido HVAC aéreo cuando el impuesto llega a 150 dólares por tonelada de CO₂. Los impuestos por emisiones de CO₂ en Europa son ahora del orden de 25-40 dólares por tonelada de CO₂.

Un impuesto muy alto sobre emisiones de CO₂ hace económicamente interesante la captura de CO₂. La captura y el almacenamiento en un yacimiento próximo del 80% de las emisiones de CO₂ (un límite justificable económicamente) hace que el tendido aéreo HVDC se vea superado por la opción de carbón gasi-

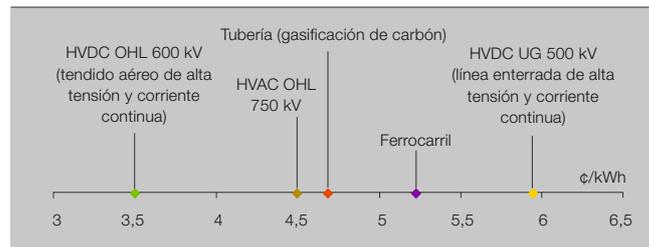
ficado y gasoducto sólo si el “punto de equilibrio del impuesto sobre emisiones de CO₂” sube hasta 300 dólares por tonelada de CO₂ 6. Además, el tendido aéreo HVAC será una opción más cara que la del carbón por ferrocarril con un impuesto de 1.300 dólares por tonelada de CO₂. Por tanto, la captura de CO₂

aumenta la competitividad de las tecnologías de cable (se tienen presentes los costes de captura de CO₂).

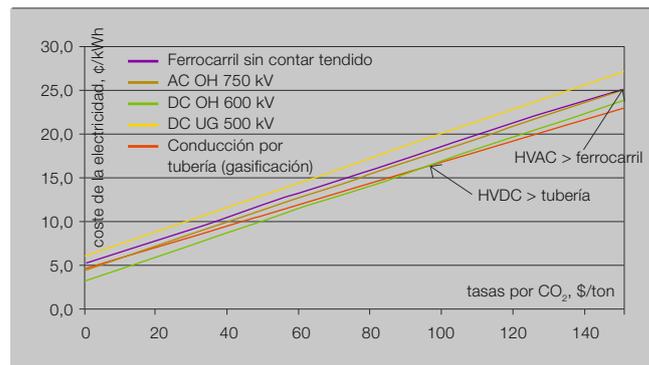
De acuerdo con el modelo BET, la repercusión de los costes externalizados en el transporte masivo de energía muestra que la transformación inicial del carbón en electricidad y su transporte con tecnología HVDC supone una importante mejora sobre el transporte tradicional por tierra de los recursos energéticos primarios. Las tecnologías HVDC proporcionan posibilidades estratégicas de reducción de los costes externalizados. Los autores creen que es muy probable que el transporte masivo de energía a gran distancia cambie de la movilización de recursos energéticos primarios a la transmisión de energía eléctrica.

Hay que tener en cuenta que los datos de entrada aquí utilizados están afectados por cierta incertidumbre.

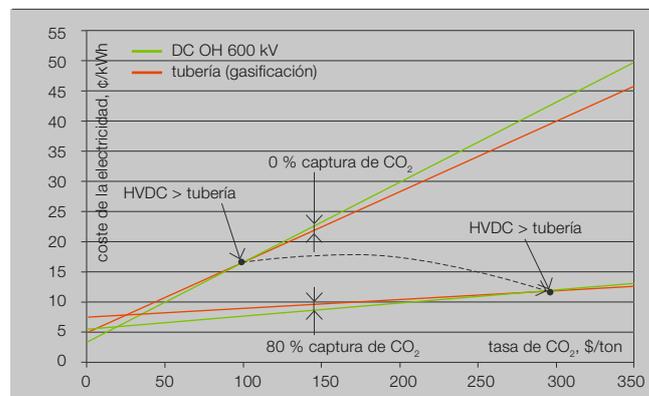
4 Coste de la electricidad en el centro de carga (caso BAU)



5 Influencia del impuesto sobre emisiones de CO₂ en el coste de la electricidad en el centro de carga



6 Punto de equilibrio de la tasa de emisiones de CO₂ para tendido aéreo HVDC y transformación de carbón a gas por conducción de tubería para 0 y 80 % de captura de CO₂.



Referencias

- [1] Bahman, M.; Johnson, B., (2007) *The ABCs of HVDC Transmission Technologies*, revista IEEE Power & Energy, n.º 3/4, pp. 32–44.
- [2] Clerici, A.; Longhi, A., (1998) *Competitive Electricity Transmission System as an Alternative to Pipeline Gas Transport for Electricity Delivery*, Actas del XVII Congreso Mundial de la Energía, Houston, TX, EE.UU.
- [3] Bergerson, J.; Lave, L., (2005). *Should We Transport Coal, Gas, or Electricity: Cost, Efficiency, and Environmental Implications*, Environmental Science & Technology, Vol. 39, No. 16, 5905-5910.
- [4] Oudalov, A.; Reza, M., (2007). *Externality Implication on Bulk Energy Transport*, Actas de la XXVII Conferencia de la Asociación de EE.UU. para la Economía de la Energía, Houston, TX, EE.UU.
- [5] Mercado Europeo de Intercambio de Energía, cuotas de CO₂ en la UE para 2007–2008, www.eex.en (noviembre de 2007).

Alexandre Oudalov

Investigación corporativa de ABB
Baden-Dättwil, Suiza
alexandre.oudalov@ch.abb.com

Muhamad Reza

Investigación corporativa de ABB
Västerås, Suecia
muhamad.reza@se.abb.com