

Emisiones de calderas

La generación de electricidad permite utilizar prácticamente la totalidad de las fuentes energéticas a través de múltiples tecnologías. Por ello la evolución de la estructura de producción de las distintas fuentes primarias y tecnologías, es un reflejo tanto de la aplicabilidad y disponibilidad real o percibida, que determina sus costos directos, como de sus efectos, reales o percibidos socialmente, de los que se derivan sus costos externos o sus posibilidades de aceptación.

En el 2003, un 65,3% de la generación de electricidad a nivel mundial procede de la combustión de recursos fósiles: carbón, petróleo y gas. La generación nuclear representa un 16,6% y la correspondiente a energías renovables un 18,1%.

Queda patente pues la importancia que en la producción de electricidad tiene la generación térmica con utilización de recursos fósiles, que ocupa el primer lugar entre las alternativas actualmente empleadas.

La utilización de recursos fósiles conlleva en primer lugar el agotamiento de unas reservas que la naturaleza ha tardado miles de millones de años en producir.

Las reservas probadas a nivel mundial de combustibles fósiles representaban a finales del año 2003 unos 156.000 millones de toneladas para el petróleo; para el gas natural, unos 175.780.000 millones de metros cúbicos, equivalentes a 158.202 millones de toneladas de petróleo, y para el carbón unos 984.453 millones de toneladas, equivalentes a 484.475 millones de toneladas de petróleo.

Las cifras de consumo anual de estos recursos en el año 2003 representaron, en millones de toneladas equivalentes de petróleo, unas cifras aproximadas de 3.600 para el petróleo, 2.300 para el gas natural y 2.500 para el carbón.

Tal como pone de manifiesto la Tabla 1, al ritmo actual de consumo las reservas actuales de combustibles fósiles tendrían en su conjunto una vida de unos 93 años (vida útil estática).

Un progresivo aumento en el consumo de energía reduciría esta vida útil. El desarrollo de mejoras tecnológicas, junto con un incremento en los precios aceptables, pueden conducir a un aumento de las reservas incorporando recursos que hoy en día pueden considerarse como no convencionales. Sin embargo, es de señalar que, en todo caso, se trata de unos recursos que si bien a mediano plazo pueden ser suficientes con una óptica de sostenibilidad, a largo plazo son esencialmente limitados.

En segundo lugar la utilización de combustibles fósiles representa la emisión de los gases producidos en la combustión. Esta emisión de gases y partículas arrastradas por ellos, es su efecto ambiental más característico.

Por su propia naturaleza la combustión de recursos fósiles, materia orgánica carbonizada o transformada en hidrocarburos, produce dióxido de carbono. Ello es consustancial con el propio proceso que, al crear fuertes enlaces carbono-oxígeno, permite la liberación de la energía utilizada.

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero. En el momento actual, su contribución al calentamiento global es el preponderante entre la correspondiente a otros gases cuya emisión contribuye también a este efecto: metano, óxido nitroso, CFC's. En la Unión Europea sus emisiones representaron más del 80% del total de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, y su origen fundamental son los procesos de combustión.

Adicionalmente, en el proceso de combustión pueden derivarse emisiones de óxidos de nitrógeno, formados esencialmente por la oxidación de nitrógeno contenido en el aire de

combustión; emisiones de óxidos de azufre, derivadas del contenido en azufre del combustible; emisiones de metales pesados, singularmente de mercurio contenido en el combustible; y partículas, pequeñas cenizas originadas en la combustión.

Tabla 1. Reservas y consumo de combustibles fósiles¹			
	Reservas	Consumo	Vida útil estática
	millones de tep		Años
Petróleo	156790	3636	43
Gas natural	158202	2356	67
Carbón	484475	2587	187
Total	799377	8579	93

¹ *BP Statistical Review of World Energy*, June 2004.

Esencialmente constituyen contaminantes, con efectos potenciales sobre la salud y sobre el medio. Su deposición puede dar lugar a lluvia ácida y a procesos de eutrofización (Biología, Acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino o en un lago, laguna, embalse, etc., que causa la proliferación de ciertas algas).

Los óxidos de nitrógeno son adicionalmente precursores de la formación de ozono troposférico, dando lugar al smog o niebla fotoquímica.

Los efectos de estas emisiones pueden tener un carácter global sobre la totalidad del planeta o un carácter restringido a áreas más o menos extensas en función de la dispersión de la que pueden ser objeto, de acuerdo con su vida media en la atmósfera o con sus condiciones de deposición en el medio.

La transformación termodinámica del calor producido en energía mecánica exige el empleo de un foco frío. Los efectos de esta exigencia sobre las aguas superficiales (ciclos abiertos) o sobre la atmósfera y la utilización de recursos hídricos (aerocondensadores y ciclos cerrados) tienen que ser contemplados, si bien usualmente se trata de impactos de carácter local y restringido.

Finalmente, tanto la combustión como los procesos que puedan ser implantados para la depuración de los gases producidos pueden originar residuos. Su volumen puede ser importante cuando se utilizan combustibles sólidos con alto contenido en cenizas.

Ante estas acciones, asociadas a la utilización de combustibles fósiles en la generación de electricidad, se consideran líneas de actuación para reducir sus efectos. Conllevan medidas administrativas y programas tecnológicos y en general existe a nivel mundial una coincidencia en los objetivos propuestos, si bien este acuerdo no ha alcanzado a la totalidad de la normativa desarrollada para alcanzarlos.

Potenciación de otras fuentes energéticas. Las fuentes de energía renovables

Una primera línea de actuación es la potenciación de otras fuentes energéticas primarias con menores costos ambientales. Las energías fósiles tienen y continuarán teniendo un papel importante en la generación de electricidad. Sin embargo, tanto el propio desarrollo tecnológico de las fuentes de energía renovables, como el apoyo administrativo y su implantación han de favorecer su penetración en la estructura de la generación de electricidad.

A nivel europeo, esta potenciación de las energías renovables se revela en el Libro de Verde sobre la Seguridad de Abastecimiento Energético (noviembre de 2000) y fundamentalmente en la Directiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, sobre la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de electricidad, que no sólo define las líneas generales para el establecimiento de programas a nivel estatal de fomento de la generación de electricidad con energías renovables, sino que fija también objetivos a nivel nacional.

La mejora en las tecnologías de generación eléctrica con combustibles fósiles

El papel de la generación de electricidad con combustibles fósiles mantendrá, cuanto menos en el horizonte de planificación actual e incluso con la potenciación del papel de las energías renovables, una importancia capital.

Por ello la mejora de los tecnologías de generación eléctrica con combustibles fósiles es básica en la reducción de los efectos ambientales atribuibles globalmente a la electricidad.

La mejora del rendimiento

Obtener un aumento en el rendimiento de los sistemas de generación supone una reducción del combustible utilizado por unidad de energía producida. Ello contribuye a limitar la utilización y el agotamiento de recursos naturales limitados.

Sin embargo este no es sólo su único efecto. Los gases de combustión están relacionados con cantidad de combustible utilizado. A igualdad de condiciones una reducción en la utilización de combustible contribuye a limitar las emisiones derivadas de la generación de electricidad.

Una mejora en el rendimiento es básica pues para la reducción de la contribución al efecto invernadero de la generación con combustibles fósiles. El avance desde rendimientos típicos del 35% a rendimientos próximos al 60% de modernos desarrollos puede suponer por sí sólo reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de energía eléctrica producida próximas al 40%.

Análogas reducciones se obtienen en la reducción del consumo de combustible.

En todas las tecnologías de utilización de energías fósiles se han producido desde su inicio avances considerables en los rendimientos obtenidos.

Los ciclos combinados, mediante la utilización de un ciclo de Brayton (turbina de gas), la generación de vapor aprovechando el calor residual de los gases de escape de la turbina y su utilización en un ciclo de Rankine (turbina de vapor) permiten acercarse a los rendimientos del 60% señalados.

El desarrollo de pilas de combustible con utilización de vectores energéticos, hidrocarburos o hidrógeno, derivados de los combustibles fósiles puede asimismo contribuir a esta mejora de rendimiento. En todo caso debe considerarse el rendimiento global de la totalidad del ciclo de transformación del recurso fósil en vectores finales o hidrógeno y de su posterior conversión en electricidad.

Cogeneración

La cogeneración, producción combinada de energía eléctrica y calor útil, supone el aporte de una mayor eficiencia energética global al ciclo de generación de electricidad.

Sus efectos son equivalentes a una mejora en el rendimiento y suponen una reducción del combustible utilizado por unidad de energía, eléctrica y térmica, producida.

Como en el caso anterior, ello contribuye a limitar la utilización y el agotamiento de

recursos naturales y a limitar las emisiones derivadas de la generación de electricidad y calor.

Los avances experimentados en la tecnología, con rendimientos obtenibles superiores y el fomento de tipos de cogeneración no industriales, sino con aplicaciones en el sector terciario, como el “district heating”, pueden favorecer adicionalmente su implantación.

En el ámbito europeo ello se ratifica con la emisión de la nueva Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía y que modifica la anterior Directiva 92/42/CE.

[La reducción de emisiones contaminantes

Las emisiones constituyen, como se ha señalado, el efecto ambiental más característico e importante de la generación de electricidad con combustibles fósiles.

Su reducción, siempre importante, constituye en la actualidad en una sociedad con utilización masiva de energía a nivel mundial, un factor crucial.

Como se ha señalado las emisiones de gases de efecto invernadero, singularmente de dióxido de carbono, forman parte sustancial del proceso de combustión, la creación del enlace carbono-oxígeno permite precisamente la liberación de la energía utilizada en el proceso de generación de electricidad. Dada la importancia global de sus efectos y la novedad de las tecnologías planteadas para evitarlos, el secuestro y aislamiento del dióxido de carbono son temas de gran importancia.

Las emisiones contaminantes, esencialmente, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, partículas y metales pesados, derivan de contaminantes contenidos en el combustible o de procesos adicionales asociados a la combustión.

Sus efectos son asimismo importantes, fundamentalmente a una escala regional, con efectos directos sobre la salud, la economía y el medio. Históricamente han sido objeto de atención, al ser perceptibles más directamente. Sin embargo el incremento en el consumo de energía ha conducido a su extensión y las medidas, legales y tecnológicas para su limitación han alcanzado una gran importancia.

Desde el punto de vista legal, en Europa, las directivas sobre calidad de aire y concretamente las directivas 1999/30/CE –que establece límites para el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, las partículas y el plomo en el aire ambiente– y 2002/3/CE –que establece límites para el ozono– juntamente con las directivas que limitan las emisiones de la grandes instalaciones de combustión, y concretamente la Directiva 2001/80/CE, imponen conjuntamente restricciones de importancia a las emisiones de contaminantes por las centrales térmicas.

Desde el punto de vista tecnológico las medidas técnicas de reducción han alcanzado un elevado desarrollo y permiten una reducción de las emisiones de contaminantes hasta alcanzar niveles muy bajos.

Técnicas de reducción de emisiones de partículas

Se trata, históricamente, de las primeras medidas aplicadas. Las cenizas de la combustión, arrastradas por los gases de combustión, han constituido y constituyen uno de sus efectos ambientales más notorios y significativos.

Desde el punto de vista primario, la emisión de partículas está ligada a la cantidad de inquemados producidos en el proceso de combustión. Depende por ello, no sólo de que el propio proceso de combustión sea completo, sino también de la composición del combustible. Su contenido de materia inorgánica se transformará esencialmente en cenizas.

Por ello son los combustibles sólidos los que presentan en mayor medida esta problemática.

Las técnicas de reducción secundaria de emisiones de partículas operan sobre los gases de combustión producidos, alcanzan en la actualidad eficiencias muy importantes, que pueden llegar hasta el 99,9%.

Estas eficiencias son, sin embargo necesarias para mantener niveles adecuados de calidad del aire, acordes con la reglamentación, esencialmente en el caso de utilización de determinados combustibles sólidos.

Por otra parte, las eficiencias varían con el tamaño de las partículas contenidas. En adición a la emisión total de partículas, su espectro de tamaños determina sus efectos. Tamaños menores presentan mayores efectos sobre los seres vivos, al rebasar sus mecanismos de retención. De aquí la importancia concedida sucesivamente a las partículas de menor diámetro. Las técnicas de reducción de emisiones presentan asimismo menores eficiencias ante menores tamaños de partículas.

Esencialmente están basadas en tres tecnologías:

- **Precipitadores electrostáticos** con extracción seca o húmeda de las partículas captadas. Son los elementos más comúnmente utilizados. Su eficiencia frente a partículas mayores de 10 micras puede alcanzar el 99,5%. Sin embargo disminuye para partículas de pequeño tamaño, llegando a alcanzar el 96,5% para partículas de 1 micra. Los esfuerzos de desarrollo se dirigen a aumentar la eficiencia para pequeños tamaños.
- **Filtros de mangas.** Consiguen eficiencias muy altas, tanto para partículas grandes (99,95% para diámetros superiores a 10 micras) como pequeñas (99,6% para partículas de 1 micra). Su utilización comienza a ser difundida, especialmente al poder ser combinada en aplicaciones tecnológicas para reducir la emisiones de dióxido de azufre, por vía seca o semiseca, como se analizará en el siguiente punto. La disminución de las pérdidas de carga y la mejora en la duración de los filtros son temas de desarrollo actual.
- **Sistemas de lavado húmedo.** Basados en la pulverización de agua sobre los gases de combustión para el arrastre de las partículas contenidas. Usualmente constan de un venturi para la pulverización de agua en los gases de combustión y de un separador ciclónico, al que pasan para separar de ellos la fase líquida arrastrada. La fase líquida es recirculada, efectuándose purgas para la extracción de la partículas depositadas.

El lavado húmedo supone una reducción de temperatura de los gases y una saturación de agua de los mismos. Su uso exclusivamente para la eliminación de partículas se ha reducido, teniendo en cuenta las alternativas existentes. Sin embargo y como en el caso anterior su aplicación combinada con tecnologías de reducción de emisiones de dióxido de azufre y de metales por vía húmeda es frecuente.

Los sistemas de lavado húmedo permiten altas eficiencias (del 99,9% para diámetros superiores a 10 micras hasta el 98,5% para partículas de 1 micra).

Técnicas de reducción de las emisiones de óxidos de azufre

Desde el punto de vista primario, la emisión de óxidos de azufre está ligada a la cantidad de azufre contenido en el combustible, que en el proceso de combustión se transformará en dióxido de azufre.

La eliminación de azufre del combustible constituye pues la medida primaria para la reducción de estas emisiones. Las normativas ha limitado progresivamente los contenidos de azufre de los combustibles líquidos y gaseosos aplicando técnicas de desulfuración de los mismos, hasta niveles bajos. El lavado de carbones contribuye a la eliminación de compuestos en los que queda contenido. En todo caso son usualmente los combustibles

sólidos los que presentan en mayor medida esta problemática.

Las técnicas de reducción secundaria de emisiones de dióxido de azufre operan sobre los gases de combustión producidos y llegan a alcanzar eficiencias del 90-95%⁷.

La técnica más utilizada es el lavado húmedo con lechada de caliza. Esencialmente, el carbonato cálcico reacciona con el dióxido de azufre formando sulfito cálcico, que puede oxidarse, de forma natural o forzada, a sulfato cálcico.

La extracción de grandes cantidades de azufre significa la utilización de cantidades importantes de caliza y la generación asimismo de cantidades importantes de subproducto. En este sentido es importante que este último, por responder a un proceso forzado de oxidación, éste constituido esencialmente por yeso y sus características permitan su utilización. De no conseguirse esta oxidación puede requerirse destinar a vertedero el producto obtenido.

Adicionalmente, y tal como se ha señalado en el punto anterior, el lavado supone dejar a los gases de combustión en condiciones de humedad y temperatura próximas a la saturación, que pueden incluso exigir su recalentamiento mediante un cambiador de calor.

Junto con las técnicas de lavado húmedo, se plantean técnicas semisecas o secas, basadas en la adición de lechadas concentradas, o incluso polvo, de hidróxido cálcico a los gases de combustión. La reacción se produce en vía seca, produciendo como en el caso anterior sulfito y sulfato cálcico que son arrastrados por los gases. La separación se produce mediante filtrado de los gases de combustión.

Usualmente se introducen sistemas de reciclaje para conseguir una adecuada utilización del reactivo. La vía seca supone rendimientos menores que se traducen usualmente en la utilización de mayores cantidades de reactivo (superiores entre el 10 y el 40%) y la reducción del rendimiento de separación (85-95%).

En el extremo la adición de los reactivos a los gases de combustión para la reducción de los óxidos de azufre puede realizarse en línea incluso desde el propio proceso de combustión. Los rendimientos obtenidos serán variables dependiendo de las condiciones en que se realicen. Se reportan rendimientos desde el 40 al 90%.

Técnicas de reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno

Tras la reducción de las emisiones históricamente más significativas del proceso de combustión –partículas y óxidos de azufre– ha cobrado importancia la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La emisión de óxidos de nitrógeno es esencialmente independiente de la composición del combustible, ya que su generación se produce en el proceso de combustión a partir del nitrógeno atmosférico. La producción de electricidad, que en algunos casos debe utilizar combustibles de menor calidad y potencialmente contaminantes, no ocupa por ello más que un papel secundario en las emisiones de óxidos de nitrógeno, cuya primera causa es debida a la combustión en los vehículos: el tráfico.

La reducción de los óxidos de nitrógeno generados en el proceso de combustión parte de medidas primarias: modificación del propio proceso para reducir la formación de óxidos de nitrógeno, singularmente por utilización de quemadores de baja producción de NOx.

La reducción primaria de la producción de NOx se basa en:

- Reducción de la temperatura de combustión, que disminuye la formación de NOx. Puede suponer reducción de rendimiento.
- Reducción del exceso de aire de combustión. La reducción de la disponibilidad de

oxígeno contribuye a reducir la formación de NOx. Puede conducir a combustión incompleta.

De acuerdo con estos principios los quemadores de bajo NOx se basan en adecuar:

- La distribución del aire, con creación de dos zonas de combustión: zona primaria con alta temperatura, pero con déficit de oxígeno, y zona secundaria con inyección de aire que concluye la combustión a baja temperatura.
- La recirculación de los gases de combustión, reintroduciéndolos en la zona de combustión, lo que reduce la disponibilidad de oxígeno en ella.
- La distribución de combustible, con creación de una segunda zona de requemado por inyección adicional de combustible que reacciona en déficit de oxígeno, y finalmente de aire para completar, a baja temperatura, la combustión.

Estas alternativas conducen a reducciones en las emisiones de óxidos de nitrógeno cifradas en el 65%.

La reducción a menores niveles puede realizarse mediante medidas secundarias, aplicadas a los gases resultantes de la combustión: **reducción selectiva catalítica** (SCR) y **reducción selectiva no catalítica** (SNCR). Ambas están basadas en la adición a los gases de combustión de amoníaco (o de urea) como agente reductor que reacciona con los óxidos de nitrógeno formando nitrógeno molecular y agua.

En el primer caso se realiza a temperaturas del orden de 300 a 400 °C precisando la utilización de catalizadores. En el segundo a temperaturas altas, entre 850 y 1.100 °C no precisando catalizadores.

En ambos casos se pueden llegar a obtener muy bajas tasas de emisión. El límite a dicha reducción viene dado por la posibilidad de mantener en las emisiones excesos de amoníaco, mayores en la medida en que se deseen tasas de emisión más bajas de NOx. La reducción selectiva catalítica, más eficiente, permite obtener reducciones del 95%.

Metales pesados: mercurio

Tras considerar la reducción de los contaminantes definidos tradicionalmente como los principales asociados al proceso de combustión, tanto por su significación como por el valor de las concentraciones alcanzadas en los gases de combustión, se ha considerado la reducción de contaminantes emitidos en muy pequeñas concentraciones pero cuyos efectos pueden ser apreciables dada la progresiva importancia del proceso. Es el caso de los metales pesados, destacando entre ellos el mercurio.

Los diferentes carbones presentan, en mayor o menor proporción, trazas de mercurio, de forma que la combustión es una de la fuente de emisión a la atmósfera de este metal.

En los países en los que las fuentes tradicionales de mercurio –entre ellas metalurgia, industria clorocáustica, baterías, fungicidas, usos médicos– reducen su importancia, la cobran las fuentes derivadas de la combustión y entre ellas de la incineración de residuos y de la combustión en centrales térmicas.

Las tecnologías de filtración y de reducción de óxidos de azufre, tanto en vía húmeda como en vía seca, suponen una captación sustancial de mercurio. La incorporación adicional de los sistemas de reducción catalítica incrementa considerablemente la retención de mercurio, que de esta manera puede llegar hasta cifras de reducción del 80%.

Otras líneas de mejora: refrigeración y residuos

El uso del agua como fuente fría es un efecto ambiental típico en la generación térmica de electricidad. Su calentamiento o su evaporación, al utilizar ciclos cerrados con torres húmedas de refrigeración, constituyen efectos a considerar. La gestión adecuada de

estos efectos y la utilización de las tecnologías de refrigeración más adecuadas en cada caso puede contribuir a su reducción.

La utilización de combustibles y principalmente de combustibles sólidos puede conllevar una importante generación de residuos: escorias, cenizas o componente derivados de la depuración de gases.

La consideración, en la mayor medida posible, de estos elementos como subproductos de utilidad en otros sectores y procesos puede aliviar la generación de residuos. La utilización de cenizas en la fabricación de cemento, o del yeso producido en la desulfuración en construcción son algunas de las posibles aplicaciones que deben ampliarse y desarrollarse.

Reducción de emisiones de dióxido de carbono en la generación con combustibles fósiles. Captura y confinamiento de emisiones

Dióxido de carbono y cambio climático

El dióxido de carbono es y ha sido siempre un compuesto presente e importante en nuestra atmósfera, es por ello un contaminante de la misma. Sin embargo, si su incorporación a la atmósfera es de tal magnitud que conduce a incrementar sensiblemente el porcentaje en que participa en su composición, puede contribuir a modificar, de forma global, su comportamiento.

Uno de los efectos de esta modificación en la composición de la atmósfera, detectado actualmente como más significativo, es su contribución a aumentar la absorción de la radiación de calor terrestre. Ello provoca una elevación de la temperatura en la que se produce el equilibrio entre la energía recibida y la emitida por nuestro planeta. Es el efecto conocido como "efecto invernadero" y su repercusión es el cambio climático a escala global.

El dióxido de carbono es el más característico de los gases de efecto invernadero. Otros gases, como el metano y el óxido nitroso, y los aerosoles sulfurados CFC's cuya emisión se deriva también en medida significativa de las actividades humanas, contribuyen al mismo.

El cambio climático es objeto de un amplio análisis a escala mundial. Ante la complejidad del fenómeno, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con el objetivo de disponer de una fuente de información objetiva y ampliamente aceptada sobre el cambio climático, sus repercusiones ambientales y socioeconómicas y las opciones de respuestas posibles.

El IPCC ha publicado tres informes los años 1990, 1995 y 2001 que han contribuido a confirmar la existencia de bases científicas relativas al cambio climático y que han sido documentos de referencia en los procesos internacionales de negociación sobre desarrollo sostenible.

El informe de 2001 ratifica las conclusiones de los dos anteriores:

- Pone de manifiesto el incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, que evalúa en el 31% desde el inicio de la revolución industrial (1750), sitúa esta concentración en el nivel más elevado desde los últimos 420.000 años y probablemente en los últimos 20 millones de años.
- Analiza las consecuencias de este incremento que, junto con el correspondiente a otros gases de efecto invernadero, se traduce en un aumento de la temperatura de la superficie de la tierra, una disminución de la capa de nieve y hielo, un aumento del nivel del mar y una mayor incidencia de situaciones climáticas extremas.
- Finalmente considera opciones de reducción y mitigación de emisiones.

Limitación de emisiones: una actuación necesaria

La necesidad de dar una respuesta a esta situación supuso, en coincidencia con la Cumbre de Río, el establecimiento de una primera plataforma para tomar medidas para hacer frente al cambio climático: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en 1992.

Su objetivo es la estabilización de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Establece el compromiso de adoptar medidas para prevenir el cambio climático en un contexto de colaboración internacional y de promoción del crecimiento económico sostenible. En esta línea se fijó para los países desarrollados el compromiso de volver, en el año 2000, individual o colectivamente, a los niveles de emisión de 1990, estableciendo procedimientos de examen de la adecuación de este compromiso al objetivo de la Convención.

Ya en el primer examen realizado en Berlín en 1995 se puso de manifiesto que era necesario un mayor esfuerzo de reducción, llegándose a un consenso en Kioto el 11 de diciembre de 1997. De acuerdo con este Protocolo de Kioto los países desarrollados deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero globalmente en un 5% para el periodo 2008-2012, en relación con las correspondientes a 1990, fijándose para cada país un porcentaje concreto de reducción.

El máximo esfuerzo corresponde a la Unión Europea a la que, en conjunto, corresponde reducir sus emisiones en un 8%, cifra superior a la acordada para los Estados Unidos (7%) o para Japón (6%). Otros países como Rusia deberán estabilizar sus emisiones o podrán aumentarlas como Australia (8%) o Islandia (10%). Dentro de la Unión Europea la reducción se distribuye en función de la situación de cada país, alcanzando el 21% para países como Alemania o Dinamarca y aumentos del 15% para España o del 27% para Portugal.

Las dificultades que ha supuesto esta ratificación del protocolo ponen de manifiesto que la necesidad de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero no parece haber quedado asumida como una cuestión prioritaria a nivel general, máxime cuando países que figuran en primera línea como emisores de dióxido de carbono han rechazado su compromiso. Sin embargo es evidente que un desarrollo sostenible no puede tener lugar sin una limitación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Equidad en la limitación de emisiones: un condicionante derivado de las desigualdades existentes

La necesidad de reducción de emisiones a nivel global se inserta en un contexto de gran desigualdad mundial en riqueza, consumo de energía y generación de emisiones.

El Consejo Mundial de la Energía pone de manifiesto en su Informe 2000 este aspecto, señalando que un 20% de la población mundial, 1.000 millones de personas de los países industrializados, consumen un 60% del abastecimiento energético. El 80% restante de la población mundial, 4.000 millones de personas de los países en vías de desarrollo, consumen únicamente el 40%.

La disparidad de este balance es aún más significativa presentada en forma individual: el 20% de la población, el más desarrollado, tiene ingresos per cápita superiores a 22.000 \$ anuales y consume 5 toneladas equivalentes de petróleo al año. El 40% de la población, el menos desarrollado, tiene ingresos inferiores a 1.000 \$ anuales y consume 0,2 toneladas equivalentes de petróleo al año. Es decir, tanto la renta como el consumo energético per cápita son unas 25 veces superiores en los países más desarrollados que en los menos desarrollados. Las emisiones de gases de efecto invernadero están en la misma proporción.

Es por ello que los países más desarrollados son los que deben soportar fundamentalmente la reducción y en este sentido tanto la Convención Marco como el Protocolo de Kioto imponen la reducción de emisiones a los países desarrollados,

excluyendo a los que se encuentran en vías de desarrollo. Las medidas de limitación de emisiones, basadas esencialmente en limitar el consumo de combustibles fósiles, no pueden cuestionar la aspiración de los países menos desarrollados a aproximar sus niveles de desarrollo económico a los de los países más desarrollados. Ello, incluso adoptando las mejores medidas de ecoeficiencia energética, puede conllevar aumentos en su demanda energética y en sus emisiones.

En menor medida esta situación se reproduce entre los países desarrollados, en función del nivel alcanzado. Si bien la reducción de emisiones tiene que ser un objetivo para todos, son lógicamente los países más desarrollados y con superiores emisiones per cápita los que deben afrontar en mayor medida la reducción.

El cumplimiento de los compromisos de la Unión Europea en el Protocolo de Kioto exige actuaciones para mantener la reducción global del 8% aceptada. La Directiva Europea sobre el Régimen de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero establece un sistema que permite asignar a las empresas cuotas para sus emisiones de gases de efecto invernadero, en función de los objetivos que corresponden a sus respectivos Estados dentro del compromiso global.

La Directiva afecta a sectores que por sus emisiones de dióxido de carbono se consideran prioritarios: actividades energéticas (instalaciones de combustión de más de 20 MW, refinerías y coquerías), producción y transformación de metales féreos (siderurgia), industrias minerales (producción de cemento, vidrio y cerámica), producción de pasta de papel y cartón. A nivel europeo se estima que estos sectores representan el 45% de las emisiones.

La Directiva prevé su posible extensión a otros sectores en el futuro. Es pertinente destacar la importancia que el transporte representa en la generación de emisiones de dióxido de carbono.

El sistema distribuye, dentro de cada Estado y de manera esencialmente gratuita, a cada empresa de los sectores afectados, unas cantidades determinadas de emisiones de dióxido de carbono (derechos de emisión). Para sobrepasar estas emisiones cada empresa deberá adquirir a otra los derechos de emisión necesarios. Opuestamente, si una empresa dispone de derechos de emisión que superan sus emisiones puede vender el excedente a las que lo precisen. Se crea así un mercado de derechos de emisión a nivel general de la Unión Europea.

El sistema ofrece flexibilidad y motiva la aplicación de nuevas tecnologías limpias en las empresas, tanto para cumplir la cuota de emisión asignada como para obtener ingresos adicionales por venta de parte de la cuota si pueden reducir sus emisiones.

El reto de la generación con fuentes de energía fósiles: la captura y confinamiento de las emisiones de dióxido de carbono

La combustión es la causa más importante de las emisiones de dióxido de carbono y en general de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el hombre.

La combustión, como la degradación de la materia orgánica descompuesta por los seres vivos, son procesos de obtención de energía creando el fuerte enlace carbono-oxígeno y por tanto con desprendimiento de dióxido de carbono. Son procesos inversos a la fijación del dióxido de carbono como materia orgánica, rompiendo dicho enlace y precisando por ello energía que realizan los vegetales. La energía es energía solar aportada a través de la función clorofílica.

Un equilibrio supone mantener la cantidad de dióxido de carbono, conservando el stock de materia orgánica existente, viva o fósil.

Se considera que la combustión de materia orgánica generada a través de la actual actividad vegetal, biomasa, no supone una reducción en el stock de materia orgánica, siempre que se queme exclusivamente la cantidad generada. Sin embargo esta combustión puede evitar aumentos en el stock de biomasa que pudieran constituir

sumideros de dióxido de carbono.

La combustión de recursos fósiles supone reducir el stock de materia orgánica fósil, en la que los vegetales, en épocas geológicamente lejanas, secuestraron dióxido de carbono. En este caso satisfacer necesidades energéticas actuales con estos recursos manteniendo el equilibrio, exige recoger y retener de alguna forma el dióxido de carbono producido.

La captura de las emisiones de CO₂

El dióxido de carbono generado en la combustión es un componente minoritario de los gases producidos en ella. Su concentración, en los gases de combustión producidos por la generación eléctrica con combustibles fósiles, oscila entre cifras del 4% para los ciclos combinados con gas natural hasta el 14% para centrales de carbón.

Desarrollar un confinamiento en condiciones técnica y económicamente aceptables supone en primer término separar o cuanto menos enriquecer sustancialmente en su contenido a los gases de la combustión.

En este sentido se desarrollan tres líneas tecnológicas de actuación:

Captura post combustión

Dentro de esta línea pueden utilizarse una gran variedad de técnicas para separar del dióxido de carbono de los gases de combustión. Las más probadas en el presente corresponden al lavado con monoetilamina (MEA).

La amina absorbe, reaccionando químicamente, el dióxido de carbono de los gases de combustión en la sección de absorción y posteriormente, por calentamiento en la columna de desgasificación expulsa, por reacción inversa, una corriente de dióxido de carbono concentrado, regenerándose la amina para su utilización.

De esta forma puede obtenerse una captura de hasta el 98% del dióxido de carbono, (para centrales de generación se proponen normalmente cifras de alrededor del 90%), con límites de hasta el 99% para la pureza del dióxido de carbono obtenido.

Captura pre combustión

La gran cantidad de gases a tratar por los procedimientos post combustión plantean esencialmente la posibilidad de conversión del combustible en hidrógeno, captando el dióxido de carbono generado en esta conversión. Ello reduce el volumen de gases tratados pero exige la realización de reacciones de gasificación fundamentalmente a partir de combustibles sólidos o de conversión de metano en hidrógeno, a partir del gas natural.

La utilización del hidrógeno una vez producido, mediante combustión o mediante pilas de combustible, queda libre de emisiones de dióxido de carbono.

Las emisiones se concentran así en la primera parte de producción de hidrógeno. El hidrógeno producido debe de ser separado de los restantes componentes de las reacciones de gasificación, lo que conlleva por una parte la separación del dióxido de carbono, y por otra orientar el proceso hacia la máxima producción de hidrógeno mediante reacciones sucesivas de otros compuestos de carbono generados (monóxido de carbono) hasta su oxidación total y conversión en dióxido de carbono.

En el siguiente punto se amplía el análisis del papel del hidrógeno como vector energético.

Combustión con oxígeno

La concentración de dióxido de carbono en los gases de combustión puede aumentarse hasta cifras del 80% enriqueciendo en oxígeno el comburente utilizado.

Ello supone la utilización de procesos costosos de enriquecimiento en oxígeno. El desarrollo de nuevas tecnologías de membranas puede sustituir las actuales técnicas

criogénicas, costosas en términos energéticos y económicos.

La utilización de esta línea puede simplificar otras acciones de depuración, al posibilitar el secuestro, no sólo del dióxido de carbono sino también, junto con él, de otros contaminantes producidos en la combustión como los óxidos de azufre.

Tras la captura del dióxido de carbono debe procederse a su presurización para su almacenamiento, transporte y posterior confinamiento.

En la actualidad se realizan experiencias previas de desarrollo en plantas piloto, no se dispone de instalaciones de dimensión comercial. En base a los desarrollos planteados la totalidad de las operaciones de captura puede representar unos costes elevados tanto desde el punto de vista económico como energético.

Los rendimientos netos pueden verse reducidos en cifras situadas entre los 8 y los 12 puntos porcentuales. La repercusión económica puede representar cifras de unos E 40 \$ por tonelada de dióxido de carbono capturado.

Estos costos no recogen los relativos al confinamiento del dióxido de carbono que serán analizados posteriormente.

Alternativas de confinamiento

Las alternativas de confinamiento de dióxido de carbono consideradas habitualmente pueden agruparse en tres diferentes áreas: confinamiento en el mar, confinamiento en estructuras geológicas profundas y confinamiento químico, en forma de compuestos minerales.

Una de las primeras alternativas consideradas para el confinamiento de dióxido de carbono es su bombeo e inyección profunda en el mar, hasta unos 1.000-2.000 m, buscando su retención a través de su disolución en el agua.

De hecho el mar retiene una parte importante del dióxido de carbono de la superficie terrestre.

Su contenido se cifra en unas 38.000 Gt de carbono, unas 50 veces más que la atmósfera terrestre, que contiene unas 750 Gt.

Por su solubilidad, el aislamiento que puede suponer la estratificación de las capas profundas de los océanos y por los ciclos biológicos que se desarrollan en el mar puede estimarse que los periodos de retención serían muy dilatados y que la retención final sería importante.

Sin embargo, el conocimiento de los efectos que podría suponer esta disolución dista de ser completo y pequeñas alteraciones en los equilibrios bioquímicos del mar podrían, como en la atmósfera, ser causa de efectos importantes.

El cambio del pH de los océanos que supondría una inyección masiva y prolongada de CO₂, compatible con la duración de las reservas de combustibles sólidos, podría tener consecuencias en los ciclos de vida marinos. Por ello los esfuerzos de investigación de esta alternativa se centran en el análisis y en la valoración de sus impactos, considerando diferentes situaciones y condiciones de inyección.

El confinamiento terrestre de dióxido de carbono, en estructuras geológicas profundas, tiene una experiencia paralela, aunque de magnitud diferente, en el almacenamiento de gas natural para el mantenimiento de reservas importantes que permitan asumir las condiciones de la demanda.

Tradicionalmente se ha considerado para dicho uso en primer lugar la utilización de los propios yacimientos agotados de gas y en general de hidrocarburos, en segundo lugar la utilización de acuíferos profundos y finalmente la ejecución ex profeso de cavidades en zonas salinas que garanticen una estanqueidad. Esta última solución queda descartada en el caso del almacenamiento de dióxido de carbono debido a que si bien proporciona una gran elasticidad y facilidad de funcionamiento, su capacidad es esencialmente limitada.

Los yacimientos agotados de gas o hidrocarburos en general están constituidos por zonas

porosas, rocas yacimiento, aisladas de la superficie por capas naturales estancas. Estas formaciones han demostrado, precisamente por haber mantenido los hidrocarburos a lo largo de un periodo muy largo de tiempo a escala geológica, su capacidad de retención y confinamiento.

Los acuíferos profundos presentan características similares. Son formaciones porosas separadas del entorno por capas impermeables, susceptibles de retener y confinar gases. Ambos tipos de formaciones pueden considerarse a profundidades de 1.000 -2.000 m con espesores de zona porosa que pueden llegar hasta 400 m.

En adición a estas estructuras geológicas, se ha propuesto el almacenamiento de dióxido de carbono en depósitos de carbón no explotables. Constituyen estructuras de retención siempre que los estratos del depósito presenten características de homogeneidad, continuidad y aislamiento.

Este tipo de almacenamiento puede permitir adicionalmente recuperar reservas de metano atrapadas en el depósito, concurrendo de esta manera dos objetivos que pueden contribuir a la reducción de los costes de confinamiento del dióxido de carbono.

Las capacidades estimadas de retención de estas formaciones se recogen en la Tabla 2 que pone de manifiesto la diferencias entre las estimaciones existentes.

Como puede apreciarse el potencial de almacenamiento más importante esta ligado a la capacidad de los acuíferos profundos, sin embargo existe para ellos una importante incertidumbre en las estimaciones, en adición, los yacimientos de gas proporcionan una capacidad significativa.

Tabla 2. Capacidades de almacenamiento estimadas para diferentes tipos de formaciones geológicas ¹⁰		
Alternativa de almacenamiento	Capacidad global	
	Gt CO ₂	% emisiones 2000 – 2050
Yacimientos de gas agotados	690	34
Yacimientos de petróleo agotados	120	6
Acuíferos profundos	400 - 10000	20 - 500
Depósitos de carbón no explotables	40	2

La capacidad total para afrontar el confinamiento de las emisiones previstas hasta 2050 está muy condicionada por las estimaciones de la capacidad de retención de los acuíferos salinos.

De aquí la importancia de continuar el análisis de otras alternativas, como la ya considerada de la inyección marina que puede aportar varios miles de Gt de capacidad o el confinamiento químico en minerales.

El confinamiento mineral se plantea básicamente como la carbonatación de calcio y magnesio. Si bien estos elementos no se presentan en la naturaleza en forma de óxidos, lo que permitiría fuertes reacciones exotérmicas de carbonatación, se presentan en forma de silicatos y, significativamente para el magnesio, en forma de serpentinas.

Pese a quedar integrados en forma de silicatos la reacción de carbonatación de dichos minerales se mantiene ligeramente exotérmica y permite plantear un confinamiento del CO₂ en esta forma. Una vez confinado su almacenamiento podía realizarse por relleno de la propia cantera del material base.

Las reservas de minerales carbonatables permiten considerar el almacenamiento de varios miles de Gt.

Las cifras actuales de costos de confinamiento del dióxido de carbono se sitúan alrededor de los E \$ 10 por tonelada. Teniendo en cuenta los costos totales de captura y confinamiento del CO₂ la repercusión sobre el costo total del kWh de electricidad sería del orden de un 40 a un 60%.