

La industria del uranio enriquecido en el mundo y su preparación para el posible renacimiento nuclear

R. Almoguera y J. A. Antón

En este artículo hemos intentado mostrar que la industria nuclear tiene en marcha planes de mejora de las instalaciones actuales (minas, plantas de producción de concentrados, plantas de conversión a UF_6 y de enriquecimiento), de ampliación de las mismas e incluso de instalación de nuevas plantas más eficientes, que aseguran un suministro de uranio enriquecido que alimente el previsible crecimiento del uso de la energía nuclear.

The nuclear industry has many plans to renew the current installations (mines, mills, UF_6 conversion and enrichment plants), expand their capacity and also plans to build new ones, in order to be prepared to supply the enriched uranium needed for the foreseeable expansion of nuclear power.



RAMÓN ALMOGUERA es ingeniero industrial del ICAI y graduado por el IESE en Administración de Empresas.

Trabaja en Iberdrola en el negocio nuclear desde 1982, habiendo participado en varios proyectos: Valdecaballeros, Vandellós 2 y Cofrentes.

Desde 2005 está al frente de la Dirección Técnica en la Dirección de Generación Nuclear de Iberdrola, con responsabilidades en combustible, ingeniería, tecnología y licenciamiento y seguridad nuclear y es el presidente de la Comisión de Aprovisionamiento de Uranio.



JESÚS A. ANTÓN es licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales por la Universidad Autónoma de Madrid y M.B.A. En 1985 se incorporó a ENUSA en la Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado (Salamanca) y en 1988 a la Dirección de Aprovisionamiento, siendo actualmente el jefe comercial dentro de la Dirección Financiera y de Aprovisionamiento; y es representante de ENUSA en la Comisión de Aprovisionamiento de Uranio, en la cual ejerce de secretario.

La industria nuclear satisface aproximadamente el 17% de la demanda mundial de electricidad. Esa energía es producida por unos 440 reactores con una potencia instalada de 385 GWe. Es una industria eminentemente tecnológica: el proceso por el que los 200 MeV de energía térmica liberados en cada desintegración por fisión de un núcleo de uranio se transforman en electricidad es la consecuencia de un espectacular desarrollo científico y tecnológico conseguido, en relativamente pocos años, a mediados del siglo pasado.

De las cuatro fases que podemos distinguir en la primera parte del ciclo nuclear, en este artículo nos vamos a centrar en las tres primeras: Producción de concentrados de uranio, Conversión a UF_6 y Enriquecimiento.

Un reactor de 1000 MWe consume unas 19 tU enriquecido al 4.4% en el isótopo U_{235} por año, contenidas en el combustible fabricado. Para ello se necesita la producción previa de 224 t de concentrados de uranio (U_3O_8 o *yellow cake*), realizar el servicio de conversión del U_3O_8 a 190 tU en forma de hexafluoruro de U (UF_6). Después es necesario efectuar el servicio de enriquecimiento de dicho UF_6 natural (0.71% U_{235}) a UF_6 enriquecido (4.4% U_{235}). Este servicio se mide en Unidades Técnicas de Separación (UTS), y se necesitan unas 114.000 UTS.

Ampliando este análisis a las necesidades mundiales de uranio del parque nuclear mundial tenemos una cifra cercana a 75.000 t de U_3O_8 (64.000 tU como concentrados de U), 60.000 tU como UF_6 (conversión) y 46 millones de UTS (enriquecimiento) para obtener unas 7.000 tU

de uranio enriquecido (fabricado) para ser introducido en los reactores. Alrededor del 5% del parque mundial de reactores funciona con uranio natural y no necesita los procesos de conversión a UF_6 ni de enriquecimiento.

En España la capacidad instalada de los 8 reactores nucleares es muy próxima a los 8.000 MWe. Por ello las necesidades anuales de combustible del parque nuclear español son cercanas a 1800 t de U_3O_8 (concentrados de uranio), 1.500 tU como UF_6 (conversión), 900.000 UTS (enriquecimiento) para obtener unas 150 tU de uranio enriquecido al 4.4% (fabricado) para ser introducido en los reactores españoles.

PRODUCCIÓN DE CONCENTRADOS

Es un proceso minero de extracción del mineral e industrial de producción del concentrado de uranio (U_3O_8).

Las principales formas de extracción del mineral son: minas a cielo abierto (37%), minas subterráneas (26%), extracción "In-situ leaching" ISL (28%) y como subproducto de la minería de otros metales como el cobre o el oro (9%) (figura 1).

La minería ISL que consiste en inyectar un líquido de lixiviación (amonio, carbonato o ácido sulfúrico) a través del agujero del taladro mediante bombeado y luego bombear en sentido inverso, hacia la superficie el líquido con el uranio, está aumentando de forma incesante su importancia, tiene un impacto ecológico mucho menor y reduce el coste de extracción del uranio apreciablemente.

A lo largo de la Historia se han producido mejoras en la minería subterránea pudiéndose explotar en la actualidad

yacimientos de uranio a 500 m de profundidad en terrenos prácticamente saturados de agua (mina de Mc Arthur River, en Canadá).

Los principales países productores de uranio son Canadá (23%) y Australia (21%). Por lo tanto, dos de los países más ricos, estables y democráticos del mundo concentran año a año casi la mitad de la

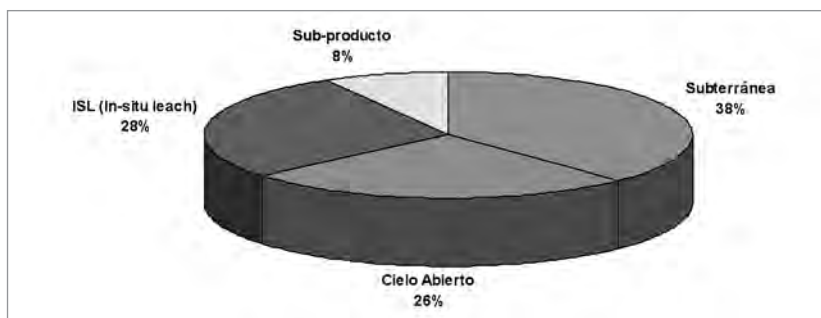


Figura 1: Principales formas de extracción del uranio.

producción mundial. En los países de la antigua Unión Soviética se concentra un 32% de la producción mundial, especialmente en Kazajistán, Rusia y Uzbekistán. África produce un 16%, especialmente en Sudáfrica, Namibia y Níger (figura 2).

Alrededor de 44.000 tU (como U_3O_8) vienen directamente de la producción de las minas (un 69%). El resto proviene de las llamadas fuentes secundarias, especialmente del acuerdo entre Rusia y EEUU para el desmantelamiento de cabezas nucleares rusas (acuerdo HEU) que proporciona unas 9.000 tU al año (14%). Del reprocesamiento de los combustibles nucleares gastados, se obtiene uranio reprocesado (RepU) y plutonio (MOX: óxido mixto de U y Pu) que se vuelve a convertir en combustible y que ahorra el uso de unas 3.000 tU natural al año (5%). Otras 5.000 tU se obtienen por el re-enriquecimiento del uranio empobrecido ("colas") de los enriquecedores europeos en Rusia.

Las mayores empresas productoras de concentrados del mundo son: CAMECO (empresa canadiense con minas en Canadá, Kazajistán, EEUU,...), RIO TINTO (con minas en Australia y Namibia), el grupo estatal francés AREVA (con minas en Níger, Canadá, Kazajistán, ...), BHP Billiton (con una gran mina de cobre y uranio en Australia), el grupo estatal Ruso Atomenergoprom (con minas en Rusia y en los países de la antigua Unión Soviética), y la compañía estatal kazaja Kazatomprom, con unos planes de expansión de su capacidad de producción en su país muy

ambiciosos, y con proyectos conjuntos con los grupos mencionados anteriormente.

Estas empresas poseen planes de expansión de sus centros productores actuales e incluso de apertura de nuevas minas para hacer frente al previsible aumento de la demanda en los próximos años, debido al llamado "renacimiento nuclear" que se encuentra en marcha en todo el mundo, especialmente en China, Rusia, India, Japón, Corea, EEUU, Reino Unido, Francia, Finlandia y, en menor medida, en otros países.

La gestión del "Pool de compras" de las empresas eléctricas propietarias de reactores nucleares se ha adjudicado a la empresa pública española ENUSA Industrias Avanzadas S.A.. La Comisión de Aprovisionamiento de Uranio (CAU) es el órgano de definición de las políticas de aprovisionamiento del uranio enriquecido así como del control de la gestión encomendada a ENUSA.

Esta gestión unificada aprovechando la experiencia y capacidad técnica de ENUSA permite una mayor seguridad del suministro, una gran flexibilidad ante los cambios, una mayor capacidad de negociación ante los suministradores, un ahorro de costes de gestión y, además, se comparten riesgos y beneficios.

Los reactores nucleares españoles a través de ENUSA son clientes de las mayores empresas productoras de concentrados del mundo: CAMECO, BHP Billiton, RIO TINTO, TENEX (del grupo ruso Atomenergoprom), NUCOR (Sudáfrica) y COMINAK (mina de Níger con propiedad mayoritaria del

grupo francés AREVA). En esta última empresa, ENUSA tiene una participación accionarial del 10%.

En cuanto a las necesidades de concentrados de España, aproximadamente el 35% del mismo procede de los dos países más importantes (Australia y Canadá), el 30% de Rusia o de los antiguos países de la Unión Soviética y el 35% de algunos de los países africanos más estables (Sudáfrica, Namibia) y de Níger, mina en la cual, como se ha mencionado anteriormente, ENUSA posee participación accionarial. Este reparto permite hacer una gestión diversificada y con una importante seguridad del suministro dado que se hace con compañías muy solventes en el mercado (figura 3).

Hasta el año 2000 hubo una producción de concentrados de uranio en España, en las instalaciones de ENUSA en Ciudad Rodrigo. Dichas actividades cesaron por razones económicas.

El coste del uranio supone alrededor del 43% del coste total del combustible nuclear. En este coste total también se incluye la fabricación del combustible, que es aproximadamente un 11% del mismo.

PROCESO DE CONVERSIÓN DEL U_3O_8 A UF_6

Es un proceso químico industrial sin gran complejidad pero, sin embargo, es una parte muy importante del proceso pues es un eslabón imprescindible de la cadena de suministro del combustible nuclear puesto que el uranio esté en forma de UF_6 permite tanto el transporte como el enriquecimiento.

Hay cuatro grandes empresas que suministran más del 99% de las necesidades mundiales de dicho servicio:

COMURHEX del grupo AREVA, en Francia con 12.000 tU de producción (25%); CAMECO empresa canadiense con 11.000 tU de producción en Canadá (23%) y otras 2.300 tU con su acuerdo de colaboración con la planta de Springfields, en el Reino Unido (5%); CONVERDYN, en EEUU con 12.000 tU de producción (25%) y TENEX en Rusia con 10.000 tU de producción directa (21%) (figura 4).

Debido a que desde el año 2003 los precios se han duplicado, y además se ha producido un incremento en la demanda prevista en los próximos años, después de muchos años de desincentivo, producida por los bajos precios tanto en los años 80 y 90, todas ellas se han embarcado en planes de mejora y ampliación de sus actuales instalaciones, o bien en lanzamiento de nuevos proyectos; como COMURHEX II, en Francia, un proyecto conjunto de Cameco con Kazatomprom, en Kazajistán, posible nuevo proyecto en Europa o en Australia de CONVERDYN.

Todos estos planes aseguran que el previsible aumento de la demanda de estos

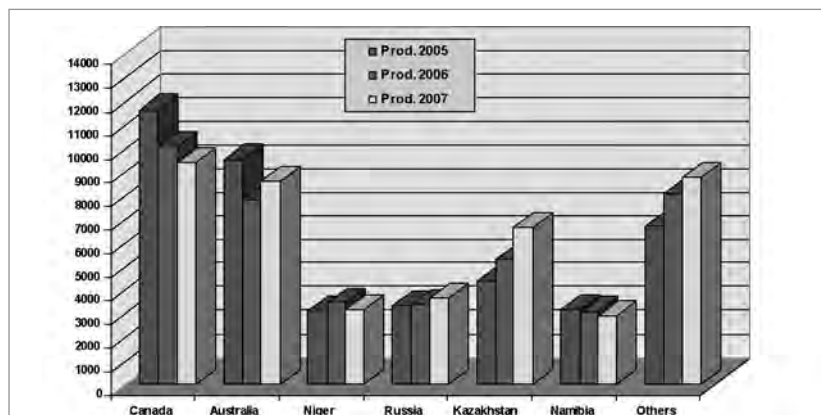


Figura 2: Principales países productores de uranio.

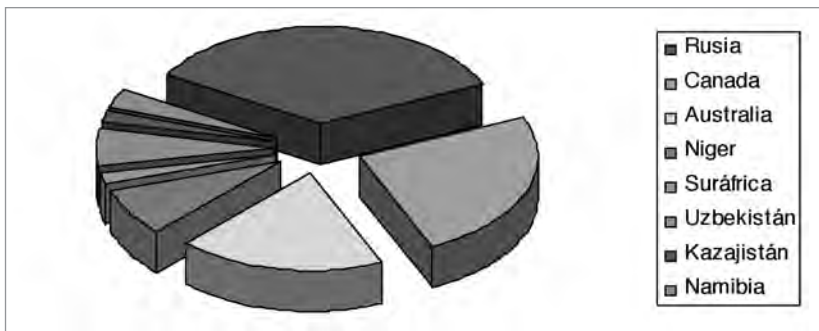


Figura 3: Compras españolas de U_3O_8 en 2008.

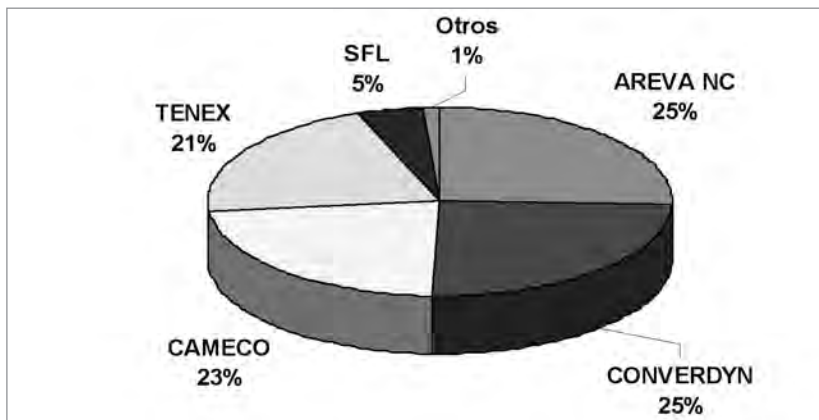


Figura 4: Capacidad mundial de producción de servicios de conversión.

Compañía	Número de Plantas	Producción 2006 (millón kgU)	Producción 2007 (millón kgU)	Capacidad 2007 (millón kgU)	Capacidad 2020 (millón kgU)
Comurthex-AREVA NC	1	12.3	13.7	14.0	19.0
Cameco (+ Springfields)	1+1	11.0+2.3	6.0+4.0	12.5+5.0	12.0+0
Covendryn	1	12.0	10.5	15.0	18.0
TENEX	3	9.0	10.0	25.0	25.0
Otros	--	0.5	0.5	1.3	6.3

Tabla 1: Compañías suministradoras.

servicios en un futuro será adecuadamente cubierto (tabla 1).

También ENUSA es cliente directo o indirecto de las cuatro cubriendo las necesidades de conversión de los reactores españoles de la siguiente manera: aproximadamente el 25% con la empresa europea, el 25% con la empresa rusa y el 50% con la americana y la canadiense.

Este proceso supone alrededor del 4% del coste total del combustible nuclear.

PROCESO DE ENRIQUECIMIENTO

El uranio que se encuentra en la naturaleza está mayoritariamente en la forma de dos isótopos, el U_{238} y el U_{235} . La producción de energía en los reactores nucleares procede de la "fisión" o rotura de los átomos de U_{235} , un proceso que libera energía en forma de calor.

El uranio natural contiene sólo un 0,7% de U_{235} , mientras que el restante

99,3% es U_{238} , que no contribuye directamente al proceso de fisión, aunque sí indirectamente ya que contribuye a la formación de isótopos fisionables del plutonio.

El U_{235} y el U_{238} son químicamente idénticos, pero difieren en sus propiedades físicas, especialmente en su masa. Esta diferencia de la masa de ambos isótopos permite mediante un proceso con alto contenido tecnológico y especialmente sensible el incremento o "enriquecimiento" del porcentaje de U_{235} .

Sólo algunos de los reactores actuales usan uranio natural, pero la mayoría de ellos usan uranio enriquecido, en el cual la proporción de U_{235} se ha incrementado desde 0,7% hasta un máximo de un 5%.

Por comparación, el uranio usado en las armas nucleares debe ser enriquecido al menos hasta el 90% en U_{235} , en plantas especialmente diseñadas para ello.

Como hemos explicado el uranio sale de la mina en forma de un producto que

se denomina concentrado (*yellow cake*) y que es un óxido estable (U_3O_8); luego este compuesto debe ser convertido a hexafluoruro de uranio (UF_6) antes de proceder al enriquecimiento.

La transformación a UF_6 se realiza gracias a las propiedades del fluor, que es monoisotópico y que hace que el UF_6 varíe de estado a presiones y temperatura fácilmente alcanzables. Si se calienta se convierte en gas y gracias a ello se puede usar en el proceso de enriquecimiento. A temperaturas inferiores se convierte en líquido y se introduce en contenedores especiales. Enfriando dichos contenedores el UF_6 se solidifica y es transportado de esta forma.

Hay un número importante de procesos de enriquecimiento que han sido desarrollados en laboratorio, sin embargo sólo dos, el de difusión gaseosa y el de centrifugación se usan en las plantas comerciales actuales. En ambos procesos el UF_6 en forma de gas se usa como material de alimentación. Las moléculas de UF_6 con átomos de U_{235} son un 1% más ligeras que el resto, y esta pequeña diferencia de masas es la base de ambos procesos.

Proceso de Difusión Gaseosa

En este proceso se fuerza al UF_6 gaseoso a pasar a través de una serie de membranas porosas o diafragmas. Como las moléculas con U_{235} son menos pesadas que las que tienen U_{238} , se mueven más rápido y tienen una probabilidad algo más alta de atravesar los poros de la membrana. Por ello, el UF_6 que atraviesa cada membrana está ligeramente enriquecido en U_{235} , mientras que el que no pasa está algo empobrecido en dicho isótopo (figura 5).

Este proceso se repite muchas veces en series de etapas de difusión que se llaman cascadas. El UF_6 enriquecido se extrae de un extremo de la cascada y el empobrecido (colas) del extremo opuesto. El gas debe atravesar unas 1.400 etapas para obtener un producto enriquecido alrededor del 4% de U_{235} .

En la actualidad alrededor del 40% de la capacidad mundial de enriquecimiento usa esta tecnología (plantas de USEC, en Estados Unidos y EURODIF, en Francia).

Proceso de Centrifugación

En este proceso se fuerza al UF_6 gaseoso a pasar a través de una serie de tubos de vacío. Cada uno de estos cilindros tienen un rotor. Cuando se hacen girar estos rotores (entre 50.000 y 70.000 rpm), las moléculas más pesadas con U_{238} tienden a concentrarse en la periferia de los mismos y las más ligeras en el centro. El gas enriquecido alimenta las siguientes etapas y el empobrecido se envía a las anteriores (figura 7).

Hay importantes plantas de enriquecimiento por centrifugación en Rusia (TENEX) y la Unión Europea (en Reino Unido, Alemania y Holanda de la empresa URENCO).

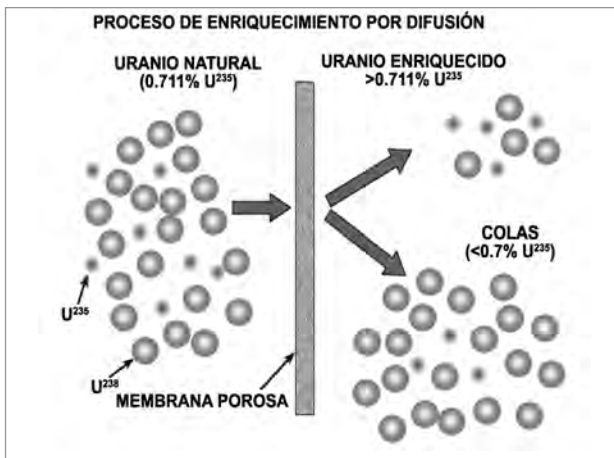


Figura 5: Proceso de enriquecimiento por difusión.



Figura 6: Proceso de centrifugación.

Tanto Japón como China operan pequeñas plantas de centrifugación. Brasil ha desarrollado recientemente una tecnología de centrifugación propia.

Pakistán también consiguió una tecnología de centrifugación que podría haber transferido a Corea del Norte. En la actualidad Irán está desarrollando una tecnología sofisticada de centrifugación.

SUMINISTRO MUNDIAL

Hay cuatro grandes empresas que suministran casi el 95% de las necesidades mundiales de dicho servicio: dos en la UE, EURODIF (cuyo mayor accionista es el grupo francés AREVA) y URENCO (Holanda, Reino Unido y Alemania); USEC, en EEUU y otra en Rusia llamada TENEX.

TENEX tiene unas capacidades de unos 23 millones de UTS y suministra directamente (27%) o indirectamente (12% mediante el acuerdo HEU) casi el 40% de las necesidades mundiales (18 MUTS).

URENCO tiene unas capacidades instaladas en sus 3 plantas de producción actuales de 9 MUTS y suministra el 20% de dichas necesidades.

EURODIF tiene una capacidad instalada en su planta GB de 11 MUTS y produce otro 20% (alrededor de 9 MUTS).

El grupo americano USEC tiene una capacidad instalada de 8 MUTS pero sólo produce el 12% de las necesidades mundiales (5,5 MUTS), aunque comercializa además el otro 12% que proviene del acuerdo HEU (otras 5,5 MUTS) (figura 8).

SUMINISTRO EN ESPAÑA

Las empresas eléctricas españolas por medio de ENUSA tal vez sean las que mayor diversificación del suministro de servicios de enriquecimiento tengan en el mundo, ya que son clientes de las cuatro empresas mencionadas. Además, ENUSA tiene una participación accionarial del 11% en EURODIF, que posee la mayor planta de enriquecimiento del mundo.

Aproximadamente el 60% de las necesidades de enriquecimiento de las centrales españolas se cubren con las 2 empresas de la Unión Europea, el 25% con la empresa rusa y el 15% con la americana.

El enriquecimiento supone el 42% del coste del combustible nuclear y alrededor del 5% del coste total de la electricidad generada en las centrales nucleares.

FUTURO DE LA TECNOLOGÍA DE ENRIQUECIMIENTO

El hecho de que el consumo energético de los procesos de centrifugación sea mucho menor que los de difusión (menos de un 10%), ha llevado a las grandes plantas de difusión de Estados Unidos y Francia a iniciar un proceso de sustitución de dicha tecnología por la de centrifugación. En unos 10 años se espera que prácticamente la totalidad de las plantas de enriquecimiento usen esta tecnología.

La planta de centrifugación de

USEC (proyecto ACP) tiene prevista una capacidad en el año 2012 de 3,8 MUTS.

La planta de centrifugación europea de AREVA (GB II) tiene prevista una capacidad de 4 MUTS en el año 2014 y de 7,5 MUTS, en el 2018.

Además están previstas dos nuevas plantas de centrifugación en EEUU; una de URENCO (proyecto NEF) con 3,2 MUTS en 2013 y 5,9 MUTS en 2015 y otra de AREVA, con otros 3 MUTS alrededor de 2019.

Existen otros procesos de enriquecimiento por LASER en estado de desarrollo, que si alcanzan una escala comercial, podrían ser la base de una nueva generación de plantas de enriquecimiento con menor coste de capital y menor consumo energético.

La más avanzada es el proyecto SILEX del grupo GE-Hitachi, que está en la actualidad en proyecto de lazo inicial de pruebas y que espera tener una planta comercial de alrededor de 1 MUTS en el año 2013. Recientemente se ha incorporado al proyecto el grupo canadiense CAMECO.

Todos estos nuevos proyectos, aseguran que el posible aumento de la demanda de estos servicios en un futuro próximo se cubrirá adecuadamente, con plantas más eficientes y con un menor consumo energético

CONCLUSIONES

En este artículo hemos intentado mostrar que la industria tiene en marcha planes de mejora de las instalaciones actuales, de ampliación de las mismas e incluso de instalación de nuevas plantas más eficientes, que aseguran un suministro de uranio enriquecido que alimente el previsible crecimiento del uso de la energía nuclear.

En otro artículo de esta misma revista sobre reservas de uranio se muestra que hay uranio suficiente y a costes competitivos que aseguran el renacimiento de la energía nuclear.■

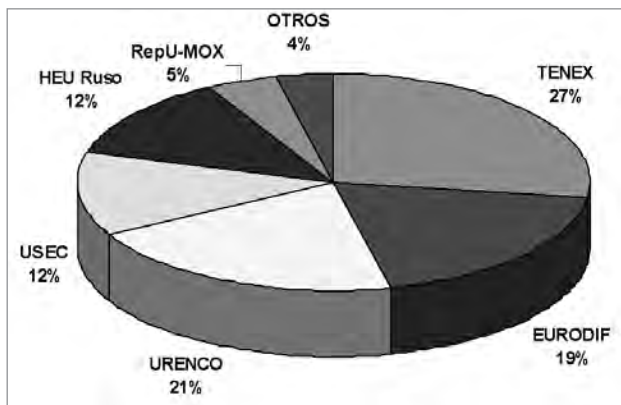


Figura 8: Principales empresas suministradoras.