

PRIMER EJERCICIO

GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

TEMA 5: Minería del uranio. Producción de concentrados. Enriquecimiento isotópico del uranio, métodos.

Índice:

1. Introducción.
2. Minería del uranio.
3. Producción de concentrados.
4. Restauración de emplazamientos mineros
5. Enriquecimiento isotópico del uranio. Métodos.
6. Riesgos radiológicos.
7. Resumen.
8. Bibliografía.

1. INTRODUCCIÓN.

El ciclo del combustible nuclear se compone de una serie de etapas industriales donde se extrae y elabora el uranio necesario para la fabricación de los combustibles nucleares de los reactores nucleares, así como las plantas donde se gestionan y almacenan los residuos radiactivos generados en las diversas etapas del ciclo, incluyendo las plantas donde se reprocesa el combustible nuclear gastado.

Existen dos fases diferenciadas del ciclo de combustible nuclear separadas propio reactor nuclear: la primera, preparación del uranio para ser introducido en el reactor en forma de elementos combustibles, y la segunda, el tratamiento de los elementos combustibles gastados una vez descargados del reactor que los ha utilizado. Si los elementos combustibles gastados se reprocesan para utilizar su material fisionable y fértil en la fabricación de elementos combustibles nucleares de óxidos mixtos (MOX), se dice que el ciclo es cerrado. Si los elementos combustibles gastados se gestionan como residuos radiactivos sin posterior reelaboración, se dice que el ciclo es abierto.

La primera parte del ciclo del combustible es la que se inicia en la extracción de mineral de uranio en las actividades mineras hasta que el elemento combustible llega al reactor nuclear (figura 1). Como actividad del ciclo del combustible nuclear es necesario incluir también el transporte de todos los materiales entre las diferentes instalaciones del mismo.

Todos los reactores nucleares emplean uranio como combustible, por lo que este tema se centrará fundamentalmente en el denominado ciclo del uranio. En el caso del ciclo de combustible cerrado, esta primera parte, incorpora además óxidos mixtos con plutonio procedentes de la reelaboración del combustible

gastado, cuyas propiedades y riesgos de manipulación, hacen que los diseños industriales de estas instalaciones varíen sustancialmente de las del ciclo abierto.

En este tema trataremos sobre las cuatro primeras etapas del ciclo del combustible nuclear abierto, que son, por orden:

- a. Minería del uranio;
- b. Fabricación de concentrados;
- c. Conversión;
- d. Enriquecimiento.

Normalmente las dos primeras se efectúan en una misma instalación, situada a pie de mina, y las otras dos se realizan en un proceso completo todo él dentro de la misma instalación.

Una vez extraído el mineral radiactivo de la mina, y reducido a un tamaño y forma apropiada, se somete a un proceso hidrometalúrgico del que se obtiene un concentrado de uranio en forma de diuranato u óxido de color amarillo denominado “yellow cake” (U_3O_8).

Posteriormente, el concentrado se purifica y se transforma en “hexafluoruro de uranio” (UF_6), compuesto utilizado para la separación isotópica posterior. Por medio de difusión, centrifugación u otro proceso al que se somete el UF_6 , se consigue elevar el contenido en el isótopo fisionable.

Con posterioridad a estas etapas, y dentro de la primera parte del ciclo, se procedería a la reconversión del UF_6 enriquecido en óxido de uranio (UO_2) con el que se procedería a la fabricación de los elementos combustibles

Como objetivo general, dentro de la seguridad nuclear y la protección radiológica, en todas estas instalaciones deberán prevenirse y minimizarse los riesgos, limitando los impactos sobre el individuo, la población y el medio ambiente a niveles aceptables. Además, todo movimiento de materiales debe estar sujeto a control administrativo.

2. MINERÍA DEL URANIO.

El uranio es un elemento químico radiactivo del grupo de los actínidos, con elevado peso atómico y peso específico, que se encuentra en la naturaleza en forma de 3 isótopos con la siguiente proporción:

U-238	99,27 %
U-235	0,72 %
U-234	0,01 %

El U-235 es fisionable por neutrones térmicos y por ello es el isótopo necesario para la producción de energía nucleoelectrónica.

El uranio es un material relativamente abundante en la naturaleza, el contenido geoquímica medio de las rocas varía entre 1 y 5 ppm (partes por millón o gramos por tonelada) llegando a valores apreciables de 50 a 100 ppm en materiales como pizarras, granitos, fosfatos, lignitos, etc. Cuando el contenido de las rocas es superior a 300 ppm, puede tener interés para su explotación como yacimiento minero y tratamiento para la obtención de concentrados.

La mineralogía del uranio es numerosa conociéndose cerca de 150 variedades. El uranio, que no se encuentra en estado natural como nativo ni en forma de sulfuros, está en los minerales en dos estados de valencia; tetravalente y hexavalente, con un comportamiento diferente frente a la solubilización. En forma primaria, en estado predominantemente tetravalente e insoluble, se encuentran minerales relativamente estables como la pechblenda y la uraninita (de fórmula genérica UO_2) en formaciones rocosas ígneas y metamórficas; en formas más oxidadas (carnotita, autinita, torbenita, gumita); o en forma refractaria (euxenita, davidita, betafita, etc.). El mineral más rico en uranio es la pechblenda.

Estas formas primarias pueden pasar, por meteorización, a un estado de oxidación hexavalente, solubilizándose en el agua circundante, lo que explica su amplia distribución en las aguas continentales y marinas. Debido a esta solubilización, aparece también en las formaciones sedimentarias donde, en condiciones reductoras (con H_2 o presencia de materia orgánica), puede llegar a un estado de oxidación insoluble, formándose importantes depósitos de uranio.

Desde 1967 se viene trabajando desde la AEN (OCDE) y el OIEA conjuntamente en el grupo internacional "Uranium group" que emite informes periódicamente acerca de los recursos uraníferos existentes en todo el mundo, atendiendo a los costes de producción y a su disponibilidad (figura 2).

Los mayores recursos se localizan actualmente en los yacimientos filonianos de Australia y Canadá, con leyes próximas y superiores al 5 %, y en los yacimientos de Kazakhistán y países africanos de Namibia, Níger y Sudafrica. Entre otros yacimientos de ley inferior al 1 ‰ (uno por mil) cabe destacar los yacimientos de fosfatos de Florida. En Europa, con un volumen de reservas ciertamente menor, destacan ciertos yacimientos en pizarras cámbricas de España, a los que siguen los de Francia.

2.1 Prospección de uranio

La prospección de uranio pretende localizar concentraciones de mineral que puedan ser yacimientos explotables. Las técnicas de exploración abarcan un abanico muy amplio en función de la etapa en que ésta se encuentre, del tipo de yacimiento y del tipo de minerales que nos esperemos encontrar así como de su paragénesis.

Siguiendo un proceso de menor a mayor detalle de prospección se pueden definir las siguientes etapas y técnicas utilizadas, incrementándose las escalas de trabajo en cada una de ellas.

La **selección de áreas** tiene por objetivo definir áreas favorables a escala nacional o de grandes unidades geológicas donde desarrollar posteriores trabajos de mayor detalle. Normalmente estas áreas favorables se definen a base de estudios en gabinete de la bibliografía y geología minera de que se disponga completándola, si es necesario con rápidos reconocimientos generales sobre el terreno. Se obtiene como resultado la identificación de unidades geológicas con potencial uranífero.

El objetivo de la **prospección general** es localizar indicios o presencias de anomalías uraníferas como puede ser la presencia de gas radón, producto de la cadena de desintegración del U-238 que da origen a la serie radiactiva del uranio.

Una **investigación detallada** posterior tiene por finalidad localizar y definir posibles yacimientos y delimitarlos en superficie a partir de indicios ya localizados. Si esta investigación tiene éxito puede culminarse con una evaluación provisional de recursos “in situ” y un estudio de pre-viabilidad.

Por último en la **evaluación del yacimiento** se completan y cierran las mallas de trabajo para tener información que permitan valorar los recursos razonablemente asegurados aportando una indicación en relación a la calidad y geometría del yacimiento.

Los métodos de prospección que se utilizan en cada una de estas fases pueden ser de varios tipos, combinándose habitualmente varios de ellos:

a) Métodos directos:

Radiométricos: Debido a la desintegración espontánea del U-238 que da origen a la serie radiactiva del uranio, cuyo producto final es el Pb-206, se pueden medir radiaciones del grupo del Ra-226, siendo los detectores empleados los de ionización gaseosa y contadores de centelleo.

Geoquímicos: Se utilizan varias técnicas de determinación de minerales, como la fluorimetría, espectrometría, fluorescencia de rayos X, colorimetría y activación neutrónica. Con estas técnicas se determinan mapas de anomalías y se cuantifican éstas para determinar los recursos disponibles.

b) Métodos indirectos:

Mineralógicos: Por medio de asociaciones minerales se buscan ambientes geológicos con condiciones físico-químicas similares a las del metal que se está prospectando. Por ejemplo, pechblenda, pirita, uraninita y carnotita.

Litológicos: Se determinan mapas de espesores de estratos y características litológicas favorables a la formación de yacimientos.

Estructurales: Se calculan gradientes de presiones litostáticas y tectónicas con el objeto de buscar zonas donde pudiera haber una concentración del mineral. Como herramienta se utiliza la fotografía aérea.

c) Métodos auxiliares:

Geofísicos: Mediante medidas eléctricas, gravimétricas o magnéticas se hacen reconocimientos de amplias zonas en profundidad que permiten conocer la estructura y composición de los materiales geológicos subyacentes.

Sondeos: En fases avanzadas de la prospección, se realizan sondeos para obtener muestras y determinar con mayor precisión la ubicación de los yacimientos.

2.2 Explotación de los minerales de uranio

La explotación de los minerales de uranio requiere previamente de un estudio de viabilidad que cuantifique los recursos a explotar y analice aspectos técnicos y económicos. Por otro lado, a medida que se realizan las excavaciones se va actualizando el proyecto de corta, chequeándose las hipótesis geológicas de los estudios preliminares y haciendo controles de leyes minerales.

Los diversos métodos de explotación vienen determinados por las características del propio yacimiento (figura 3).

a) Minería subterránea o de interior.

Este método de explotación es utilizada para mineralizaciones profundas y de alta ley. Presenta grandes ventajas desde el punto de vista ambiental, pero mayores riesgos para la seguridad y protección radiológica de los trabajadores.

b) Minería a cielo abierto

Con la aparición de grandes equipos mineros que permiten grandes movimientos de tierras, se tiende a este tipo de minería, que permite además una mejor recuperación de las reservas. Por el contrario presenta un gran impacto ambiental y exige trabajar con relaciones estéril/mineral muy altas

c) Lixiviación in situ

Muy extendida en la actualidad, sobre todo en los países de la antigua Unión Soviética y USA. Pese a ser un sistema muy barato, ya que se evitan todas las operaciones mineras, tiene grandes inconvenientes medioambientales exigiendo un control de la operación muy riguroso y unas condiciones

geológicas adecuadas (una capa mineralizada permeable entre dos impermeables)

El principal problema de la minería de uranio es el gran volumen de residuos que se genera. Un aspecto importante a considerar durante la operación de las explotaciones mineras es la ubicación de las escombreras del material estéril que se genera, una vez rechazado tras pasar por un arco radiométrico. La actividad específica de estos residuos es baja, similares a la radiactividad natural de la zona. Sin embargo, su inventario es grande y sus características varían con respecto a las condiciones naturales previas a su explotación, por lo que su dispersión o emisión podría ocasionar graves problemas de contaminación ambiental.

Las aguas procedentes de los acuíferos de la mina y las aguas pluviales acumuladas son muy ácidas (en algunos casos un $\text{pH}=3$) y con concentraciones de uranio, radio y radón no apropiadas para su incorporación directa a cauces públicos, por lo que es necesario previamente tratarlas y descontaminarlas. Como medidas que se aplican para impedir el aporte directo de las aguas de mina a cauces públicos o contaminaciones del acuífero subterráneo, se encuentran las siguientes:

- Evitar que las aguas pluviales de la cuenca natural fluyan hacia la corta.
- Construcción de sistemas de drenaje y canales perimetrales.
- Adaptar los planes de labores de forma que permitan la recogida de las aguas propias de la corta, en calderas construidas en el fondo del yacimiento.
- Trasvasar las aguas recogidas en las calderas de corta a grandes balsas de almacenamiento.
- Tratar esta agua en una instalación apropiada para su descontaminación química y radiactiva. En este proceso se utilizan resinas y soluciones apropiadas al caso.
- Almacenar las aguas tratadas en balsas de gran superficie con el objeto de eliminar el mayor volumen de las mismas por evaporación, o bien utilización en las instalaciones, o vertido controlado de los excedentes líquidos a cauces públicos.

Durante la explotación minera también debe asegurarse un control adecuado de las emisiones de polvo producido durante la perforación, voladura, carga y transporte del mineral, así como de los efluentes líquidos que se puedan producir. Todo ello hace necesario tomar diversas medidas como:

- Utilización de sistemas eficaces de captación de polvo en equipos de perforación.
- Riego abundante con agua de los frentes de operación y pistas durante las distintas operaciones.
- Planificación de los procesos de carga y transporte para reducir los puntos de transferencia de materiales.
- Uso de mascarillas por parte del personal de operación.

En España históricamente se han explotado diversos yacimientos de uranio en algunas provincias de Andalucía (Jaén y Córdoba), de Extremadura (Badajoz) y en Salamanca, aunque actualmente todos estos emplazamientos mineros no están operativos y en pleno proceso de restauración ambiental.

En la provincia de Salamanca recientemente, ante el auge del precio de concentrados de uranio, se están llevando a cabo diversas prospecciones mineras al objeto de validar y evaluar las reservas uraníferas de la zona.

3. PRODUCCIÓN DE CONCENTRADOS.

El mineral de uranio procedente de la mina se presenta habitualmente en concentraciones muy bajas y debe ser convertido en un producto con una concentración en uranio superior al 65%, que respete una composición química determinada dentro de unas especificaciones establecidas al efecto.

Para llevar a cabo esta etapa de conversión, se realizan una serie de operaciones hidrometalúrgicas utilizadas en la industria convencional en las denominadas plantas de producción de concentrados de uranio.

Las operaciones básicas para la obtención de uranio obtenidos a partir del mineral del uranio son las siguientes:

1) Preparación del mineral. Se trata de reducir el tamaño de las rocas para hacerlo accesible a los procesos químicos posteriores. Se realiza mediante trituración y molienda. En algunas ocasiones es necesaria una tostación previa del mineral con objeto de facilitar su disolución posterior o eliminar algún componente de la ganga indeseable.

2) Solubilización del uranio (o lixiviación). Es la etapa que representa un mayor coste. Se realiza mediante lixivitaciones con disolventes adecuados en condiciones ambientales o bajo presión y temperatura, si los minerales son muy refractarios. Dependiendo del reactivo que se utilice el proceso se denomina lixiviación en medio ácido o en medio alcalino.

En **medio ácido**, con ácido sulfúrico diluido. Es la más utilizada por su menor coste y requiere menor molienda. Para mayor eficiencia, debe oxidarse el uranio ($U_{+4} \rightarrow U_{+6}$) empleando MnO_2 y $NaClO_3$. Como resultado del proceso se obtiene sulfato de uranilo.

En **medio alcalino**, mediante disoluciones acuosas de carbonatos. Suele emplearse con menas muy calizas. Requiere condiciones más finas de molienda que en medio ácido. Es un proceso lento, y suele realizarse a presión dentro de vasijas herméticas.

La elección de uno u otro método dependerá de consideraciones químicas y económicas, como las características del mineral, componentes de la ganga (yeso, calizas, etc.) y eficacia de las operaciones.

Como formas de operación, está la lixiviación estática que se realiza mediante riego sobre las eras de mineral que se van depositando en sucesivas capas apiladas a modo de dique; y la lixiviación dinámica, que emplea agitación mecánica, neumática y mixta.

3) Separación sólido-líquido. La pulpa obtenida por lixiviación se separa en dos fases: una acuosa o fértil, en la que se encuentra disuelto el uranio, y otra formada por residuos sólidos. Se realiza mediante un sistema de decantación a contra corriente, con una serie de espesadores y añadiendo floculantes (electrolitos que provocan la precipitación del coloide).

4) Concentración y purificación parcial. Se pueden emplear la precipitación directa, en soluciones alcalinas, aunque las técnicas más habituales son el intercambio iónico y la extracción con disolventes orgánicos. El intercambio iónico se emplea en líquidos con muy bajo contenido en uranio. La extracción con disolventes orgánicos y re-extracción posterior con solución acuosa de cloruro sódico, sulfato de amonio o carbonato sódico.

5) Precipitación y secado. El uranio de la disolución purificada obtenida tiene que precipitarse, para lo cual se utiliza amoniaco o magnesia (si ha habido lixiviación ácida), o sosa cáustica (en caso de lixiviación alcalina). La suspensión creada se filtra y la pasta resultante se seca. Este producto final sólido se llama “yellow cake” o “torta amarilla” y suele ser diuranato amónico, magnésico o sódico, o de un óxido resultante de su calcinación.

6) Envasado y almacenamiento. Dicha torta sólida se envasa en bolsas de plástico que se introducen en bidones de acero. Su almacenamiento debe reunir una serie de condiciones de seguridad y disponer de adecuada protección física, puesto que ya se considera un material nuclear sometido a salvaguardias.

En España, han funcionado cuatro plantas de producción de concentrados de uranio, la Fábrica de Uranio de Andújar (Jaén), la Planta Lobo-G en La Haba (Badajoz), la Planta Elefante (Salamanca) y la Planta Quercus (Salamanca). Estas tres últimas plantas, mas reciente, se ubicaron en las proximidades de los emplazamientos mineros que las suministraban el mineral.

Todas las plantas españolas de concentrados de uranio han cesado su operación. La Planta Lobo-G tiene concedida su declaración de clausura, en tanto que la FUA y la Planta Elefante están en el denominado “periodo de cumplimiento (fase de su plan de desmantelamiento y clausura). La Planta Quercus, en cese de explotación, está actualmente en una situación indefinida, a la espera de iniciar su desmantelamiento o de reanudar sus actividades, decisión factible en función del reciente incremento de precios del uranio.

4. RESTAURACIÓN DE EMPLAZAMIENTOS MINEROS

Tanto las explotaciones mineras como las instalaciones de fabricación de concentrados de uranio generan cantidades ingentes de los denominados estériles de minería y de proceso. Estos residuos tienen una radiactividad relativamente baja, aunque normalmente superior a la del fondo natural de las áreas donde se depositan, y pueden ocasionar un impacto radiológico ambiental perdurable en el tiempo debido a la larga vida media de los radionucleidos presentes en el uranio natural.

Una vez finalizadas las actividades mineras, y antes del abandono del dominio minero por parte de su explotador, se ha de proceder a la restauración del emplazamiento alterado para remediar y minimizar el impacto ambiental causado.

Por lo general los planes de restauración, que contemplar también la gestión de los residuos generados en de las plantas de concentrados, ubicadas por lo general en las proximidades de los complejos mineros, como las eras de lixiviación agotadas, los estériles de proceso, los diques de estériles etc., para:

- Limitar el impacto radiológico residual del emplazamiento hasta los valores más bajos posibles, considerando factores técnicos, económicos y sociales (principio ALARA).
- Acondicionar todas las estructuras que presenten casos potenciales de contaminación, de manera que se garantice el confinamiento y estabilidad a largo plazo del material radiactivo.
- Limitar las emisiones de polvo y radón de las áreas restauradas, en función de los distintos escenarios previstos APRA el uso futuro de los terrenos y potenciales planes de desarrollo en el emplazamiento.
- Proteger los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la zona, frente a potenciales contaminantes.
- Restringir el uso futuro del terreno afectado en función de la evaluación de las vías de exposición y de las dosis de radiación de las personas que habiten, trabajen o visiten el emplazamiento restaurado.
- Minimizar la necesidad del mantenimiento futuro de las actuaciones de restauración llevadas a cabo, garantizando su seguridad a largo plazo

Las líneas generales de actuación para conseguir los objetivos básicos de estos programas de restauración se basan en:

a) Caracterización del emplazamiento

La caracterización pre-operacional y post-operacional de la zona minera representa la base del programa de restauración ambiental. Esta caracterización incluye la recopilación de la información y datos sobre hidrogeología, climatología, geología, geotécnica y ecología de las instalaciones y su entorno. El sistema de exploración de la mina, el proceso de

tratamiento de los minerales y el tipo de residuos generados son los aspectos determinantes para la evaluación y caracterización del emplazamiento a restaurar.

b) Descontaminación, desmantelamiento y clausura

Basándose en las previsiones futuras del uso de los terrenos, de las instalaciones y de las obras de infraestructuras, se planificarán los trabajos de acondicionamiento de las estructuras que vayan a ser reutilizadas, de descontaminación de equipos, sistemas y componentes que queden exentos del control radiológico y de demolición de estructuras que no tengan aprovechamiento. Dado que los niveles de contaminación y radiación de estas instalaciones no son muy importantes y se trata de radionucleidos de origen natural. Las técnicas de descontaminación son convencionales como chorreado de arena, lavado con agua a alta presión, lavado con disolventes orgánicos, etc.

c) Tratamiento de aguas

La rehabilitación medioambiental de las zonas mineras requiere la necesidad de restaurar los acuíferos subterráneos y superficiales y el tratamiento de efluentes producidos por las aguas de escorrentía y filtraciones de escombreras huecos de mina y diques de estériles.

Las técnicas de tratamiento de aguas empleadas son neutralizados con lechada de cal, tratamiento con cloruro férrico, adición de cloruro bórico, cambio de ión y adsorción iónica.

d) Gestión de residuos

Los residuos radiactivos sólidos están constituidos por estériles de mina excavados desde el inicio de las operaciones y que se apilan en las escombreras próximas a los frentes de trabajo (cortas), por los minerales agotados en los procesos de lixiviación estática que permanece en las eras de lixiviación y por las colas "tailings" o residuos de proceso procedentes de la lixiviación dinámica que se almacena en los diques de lodos en zonas próximas a las plantas de tratamiento.

La restauración de estos residuos sólidos consiste en su estabilización y confinamiento "in situ" mediante una cobertura de multicapa que cumpla determinados requisitos de estabilidad a largo plazo. Dicha cobertura ejerce como barrera anti-radón (manteniendo unos valores límites en la superficie similares o inferiores al fondo radiológico de la zona). Además, debe proteger los materiales subyacentes frente a la erosión, debe impedir la contaminación de las aguas subterráneas y debe tener como función evitar la intrusión de animales que puedan verse contaminados o que, a su vez, destruyan la citada cobertura. Toda ella, con un diseño sísmico y frente a posibles inundaciones que garantice su estabilidad en toda situación.

e) Vigilancia post-clausura

Concluido el desmantelamiento de estas instalaciones y estabilizados convenientemente sus residuos, se requiere un período de vigilancia, habitualmente denominado “período de cumplimiento”, para verificar que se cumplen los criterios de diseño de las capas de cobertura utilizadas y del sistema en su conjunto funcionan adecuadamente, y el emplazamiento restaurado no tienen efectos adversos en las personas ni el medio ambiente.

Durante el período de cumplimiento la responsabilidad de la vigilancia corresponde a los titulares de las instalaciones y una vez que se verifica que se han cumplido los objetivos del desmantelamiento, se concede la declaración de clausura quedando el titular eximido de la responsabilidad del control radiológico del emplazamiento y la vigilancia corresponde al organismo responsable del control institucional del emplazamiento.

Diversas minas de uranio en Extremadura y en Andalucía han sido restauradas por ENRESA, atendiendo a lo indicado en el segundo Plan General de Residuos Radiactivos. El Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, en su disposición adicional primera, requiere un informe preceptivo y vinculante del CSN previo a la concesión de permisos y planes de restauración.

5. ENRIQUECIMIENTO ISOTÓPICO DEL URANIO. MÉTODOS.

Dependiendo del tipo de combustible que se vaya a fabricar, será necesario aplicar diferentes técnicas para obtener finalmente el producto deseado, con el grado de enriquecimiento que se requiera.

Las centrales de agua ligera, que son la mayor parte, utilizan UO_2 ligeramente enriquecido a partir de UF_6 (en la centrales PWR el enriquecimiento es de un 3.3%, mientras que en las BWR es de un 2,6%). Sin embargo, los reactores de agua pesada utilizan uranio natural, y las centrales de grafito-gas emplean uranio metálico obtenido a partir del UF_4 (“tetrafluoruro de uranio”).

El procedimiento de enriquecimiento isotópico se puede dividir en 3 etapas: purificación, elaboración del UF_6 , y enriquecimiento.

1) Purificación. Obtiene como resultado una disolución de nitrato de uranilo $[(\text{NO}_3)_2(\text{UO}_2)]$ puro.

En primer lugar se diluye el concentrado en ácido nítrico para obtener nitrato de uranilo, que contiene impurezas. Posteriormente se filtra y se extrae el uranio con disolventes. Por último, se hace una reextracción mediante agua desmineralizada.

2) Elaboración del hexafluoruro de uranio (UF_6). Se utilizan 2 vías: seca (la más utilizada) y húmeda.

a) Vía seca (sistema empleado en USA, Canadá, Reino Unido). Se siguen las siguientes fases:

- Evaporación del nitrato de uranilo puro para obtener un compuesto hexahidratado.
- Calcinación de dicho compuesto con la obtención de UO_3 .
- Reducción de UO_3 a UO_2 con hidrógeno procedente de rotura de moléculas de NH_3 anhidro.
- Fluoruración con FH anhidro a 450 ó 600°C para obtener UF_4 .
- Fluoruración para formar UF_6 , a unos 400°C.

Salvo la evaporación, las demás etapas se realizan en reactores de lecho fluido.

b) Vía húmeda (empleado en Francia). Se aplican las siguientes fases:

- Se consigue la precipitación de diuranato amónico $[\text{U}_2\text{O}_7(\text{NH}_4)_2]$ a partir del nitrato de uranilo puro y amoníaco.
- Se descompone el diuranato para obtener UO_3 mediante calentamiento.
- A partir de la obtención del UO_3 , el proceso es idéntico al de la vía seca.

En esta fase de conversión a UF_6 los riesgos se derivan de la presencia de polvo radiactivo de distintos compuestos (UO_3 , UO_2 , UF_4), y de la toxicidad del FH que se produce por su hidrólisis en contacto con la atmósfera.

Por tanto, los objetivos deberán ser el evitar escapes de estas sustancias y minimizar sus consecuencias en caso de que se produjesen tales escapes. Para ello, deberá diseñarse adecuadamente las instalaciones, con sistemas de filtrado y retención del polvo radiactivo.

En lo que afecta al manejo de UF_6 , se deberán utilizar contenedores de alta seguridad; se controlarán exhaustivamente tuberías, conexiones y válvulas; y se usarán equipos de gran hermeticidad, con un sistema de confinamiento que reduzca al mínimo la manipulación de UF_6 en estado líquido.

3) Enriquecimiento. Es un proceso necesario para la obtención de combustible con porcentajes superiores al 0.7% de U_{235} . Se realiza a partir del UF_6 . Se han desarrollado diversos métodos. Inicialmente, se experimentó con separación electromagnética, difusión térmica y difusión gaseosa, pero los dos primeros no resultaron adecuados desde el punto de vista de la producción industrial. Con posterioridad, se han desarrollado otros procesos de separación por centrifugación o por toberas, y últimamente se está experimentando con intercambio iónico y separación por láser. Los métodos de difusión gaseosa, ultracentrifugación y separación por toberas son los que presentan un mayor interés industrial actualmente, por lo que se exponen a continuación.

- a) *Difusión gaseosa*: Es el método más utilizado. Se basa en la diferente velocidad de difusión, a través de una barrera porosa, de las moléculas de los dos isótopos de un mismo elemento, como consecuencia de su diferencia de masa. Se introduce UF_6 en una celda de difusión en la que el U_{235} se difunde a través de la membrana más rápidamente que el U_{238} (la Ley de Gram. establece que, en determinadas condiciones, la velocidad de flujo de un gas a través de una membrana porosa, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del peso molecular). Es necesaria una difusión en cascada, con sucesivas pasadas, hasta obtener el enriquecimiento que sea requerido. La fracción enriquecida (la que atraviesa la membrana, pues la empobrecida sale por otro lado) se comprime mediante un compresor para bombearlo a la siguiente etapa, donde es necesario refrigerar el gas para extraer el calor generado durante dicha compresión, y donde se mezclará con la fracción empobrecida de la siguiente unidad de difusión. Este método requiere un alto consumo de energía eléctrica. En la figura 4 se representa un esquema de difusora de varias etapas.
- b) *Ultracentrifugación*: Cuando se somete un gas a un centrifugado intenso y continuo, la fuerza centrífuga provoca que en la zona periférica se concentren las moléculas más pesadas, mientras que la fracción más ligera tiende a situarse en la zona próxima al eje de rotación. El mecanismo consta de un cilindro hueco que gira a gran velocidad, siendo el gas introducido por un extremo, y teniendo dos salidas en el otro extremo, por donde se separan la fracción pesada (periferia) de la ligera (centro). Para aumentar el efecto de separación se crea un gradiente térmico entre los dos extremos del cilindro, lo que induce un movimiento continuo del gas. Al igual que en el proceso de difusión gaseosa, se establece una cascada con varias unidades de centrifugación. Las posibilidades de este método están limitadas por la velocidad máxima impuesta por la resistencia mecánica del material de la centrifugadora y por el límite de longitud debido a la aparición de velocidades críticas. En la figura 5 se representa un esquema de centrifugadora.
- c) *Separación por toberas*: Se basa en la expansión de un chorro gaseoso supersónico, a la salida de una tobera, siendo las líneas de corriente de la fracción pesada menos desviadas que las líneas de la fracción ligera. La separación de las fracciones se hace mediante un diafragma que divide el grupo de líneas más curvadas y las menos curvadas. El chorro se hace incidir sobre una pared curvada para aumentar la curvatura de las líneas. También se establece un sistema en cascada al igual que en los métodos anteriores.

Los principales problemas en esta etapa de enriquecimiento se asocian a la manipulación del UF_6 y al riesgo de criticidad. Al igual que en la fase anterior,

los sistemas deberán disponer de filtros adecuados y con los mismos requerimientos que los indicados para la fase anterior.

El uso de UF_6 por su bajo punto de ebullición presenta dificultades de manejo ya que este compuesto es sólido a temperatura ordinaria, lo que hace necesario trabajar a presiones y temperaturas que lo mantengan en forma de gas.

Por otro lado, es extraordinariamente corrosivo y, en presencia de material hidrogenado, especialmente vapor de agua, forma ácido fluorhídrico que ataca prácticamente a todos los metales. Este hecho obliga a poner especial cuidado en el diseño y operación de estas instalaciones en aspectos como: selección de materiales; limpieza y secado de las superficies que están en contacto con el gas; completa estanqueidad de los circuitos por lo que circule el gas.

El riesgo de criticidad se reduce con un control adecuado de la pureza del producto, impidiendo que la razón de moderación alcance valores peligrosos, y garantizando siempre una concentración con márgenes de seguridad suficientes. Como medidas adicionales, se deberá reducir al máximo posible la presencia de fluidos hidrogenados en los cambiadores de calor, mediante circuitos con doble confinamiento; y se deberán utilizar recipientes con una geometría segura.

Estados Unidos es el mayor ofertante de uranio enriquecido. En Europa, la sociedad EURODIF formada por Francia, Italia, Bélgica, España e Irán posee una planta de difusión gaseosa en Tricastín (Francia).

6. RIESGOS RADIOLÓGICOS Y MEDIOAMBIENTALES.

Ni la exploración del uranio ni las minas de uranio se consideran propiamente instalaciones radiactivas en España, ya que ambas actividades están reguladas por la Ley de minas. El Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas indica no obstante que tanto la explotación de las minas de uranio y como la restauración de los emplazamientos alterados por las actividades mineras deberá contar con el informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear.

El resto de las instalaciones de la primera parte del ciclo del combustible nuclear se consideran instalaciones radiactivas y deben aplicar una serie de criterios de seguridad en las fases de su diseño, su construcción, su operación y su desmantelamiento y clausura. A continuación se resumen algunos de estos requisitos más importantes.

Selección del emplazamiento adecuado:

Además de atender a las necesidades de la instalación y existencia de yacimientos minerales explotables económicamente, deben considerarse criterios ambientales, de impacto radiológico del funcionamiento de la instalación y capacidad del medio para soportar las condiciones de operación.

Para estimar el impacto de la instalación a corto y a largo plazo, deben analizarse todas las características del emplazamiento, como: demografía, geología, geografía, sismología, hidrología y meteorología.

Proyecto y construcción de la instalación:

Debe realizarse una clasificación de estructuras, sistemas y componentes, según su importancia para la seguridad y requerimientos anti-sísmicos exigibles. Todo ello basándose en un análisis de toda la gama de posibles accidentes, y en el estudio de seguridad de la instalación para hacer frente a tales situaciones previsibles. Aquellos elementos que lo requieran, deberán diseñarse atendiendo a criterios de fiabilidad, redundancia e independencia. Además, el diseño deberá facilitar la realización de inspecciones y someterse todo él a un programa de garantía de calidad.

Una característica común de las instalaciones del ciclo es trabajar con grandes cantidades de material radiactivo en forma dispersable, lo que conlleva un elevado riesgo de contaminación e inhalación de aerosoles radiactivos. Para controlar este riesgo es necesario utilizar barreras físicas de confinamiento múltiple, y sistemas de tratamiento de gases adecuados (sistemas de ventilación con filtros HEPA, precipitadores electrostáticos, y otros). Los sistemas de ventilación deberán diseñarse de modo que el flujo del aire vaya desde las zonas de menor a las de mayor actividad.

Deben preverse sistemas de tratamiento y gestión de los residuos radiactivos. Éstos además deben ser debidamente confinados según su nivel de actividad.

Se debe minimizar y prevenir la posibilidad de incendios y explosiones que puedan producir la emisión de cantidades apreciables de contaminación radiactiva. Para ello, deben utilizarse materiales incombustibles o resistentes al fuego, y disponer de sistemas de detección y extinción de incendios.

Deben implantarse sistemas para la protección radiológica del personal de la instalación, mediante controles de acceso a zonas de contaminación potencial o con niveles de radiación elevados, empleando blindajes adecuados y con sistemas de vigilancia radiológica individual y de áreas de trabajo.

Deben existir medidas de protección física acordes con la instalación que garanticen una protección con barreras físicas y permitan el control de accesos y detección de intrusos en determinadas áreas vitales o que requieren protección.

Explotación de las instalaciones:

Debe establecerse un plan de emergencia basado en el análisis de accidentes, adoptando las medidas necesarias para limitar el alcance de las consecuencias en caso de posibles accidentes.

Deben establecerse controles y vigilancia radiológica, tanto de efluentes, estableciendo límites de vertidos, como del medio ambiente, partiendo de un estudio analítico radiológico en el que se determinen radionucleidos, vías de transmisión y grupos de población críticos.

7. RESUMEN.

La primera parte del ciclo del combustible nuclear es el conjunto de etapas necesarias para conseguir el combustible que se precisa en el reactor para producir energía nucleoelectrónica.

Para la fabricación del elemento combustible se necesitan varias fases previas: Minería del uranio; Fabricación de concentrados; Purificación y conversión; Enriquecimiento. Las dos primeras suelen hacerse en la misma instalación debido a las altas cantidades de mineral que se necesitan, lo que hace inevitable la proximidad a la mina. Con la “torta amarilla” obtenida se pasa a las fases de purificación, conversión y posterior enriquecimiento.

En todas estas instalaciones del ciclo del combustible deben tenerse en cuenta una serie de criterios generales de seguridad nuclear y protección radiológica durante las distintas etapas, desde la selección del emplazamiento, pasando por el proyecto y construcción, hasta el final de la explotación y posterior clausura de la instalación.

En cuanto a la minería de uranio, el principal problema es el elevado volumen de residuos que se genera, siendo necesaria una gestión posterior de éstos. Uno de los aspectos más importantes es el control radiológico de los efluentes, del medio ambiente, junto con una continuada protección radiológica de los trabajadores.

La producción de concentrados se puede realizar con distintas técnicas, primero obteniendo una solución acuosa del mineral para posteriormente, tras varios procesos, obtener el sólido concentrado en uranio o “torta amarilla”. En esta fase se generan residuos cuya radiactividad suele ser mayor que la del entorno natural, lo que requiere para su clausura la colocación de barreras que confinen dichos residuos a largo plazo, impidiendo el escape de radionucleidos y limitando las dosis al medio ambiente.

Para la fase de enriquecimiento se dispone actualmente de diversas tecnologías, estando otras en desarrollo como el uso de intercambiadores iónicos o de láser.

Los principales problemas en esta etapa de enriquecimiento se asocian a la manipulación del hexafluoruro de uranio y al riesgo de criticidad.

8. BIBLIOGRAFÍA.

<http://www.nea.fr/html/ndd/uranium/welcome.html>

<http://www.enusa.es>

<http://www.iaea.org/>

<http://www.csn.es/>

<http://www.enresa.es/>

<http://www.NRC.gov/>

<http://www.NEA.fr/>

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio MITyC “Sexto Plan General de Residuos Radiactivos” Junio 2006.

Nuclear Energy Agency NEA Annual Report 2007.

A. López Romero “Restauración de minas de uranio” Curso sobre desmantelamiento y clausura de instalaciones nucleares y radiactivas” CSN-Ciemat 2003

ENUSA “La producción de concentrados de uranio en España. Las explotaciones mineras de ENUSA en Ciudad Rodrigo (Salamanca)”. Separata de la revista Rocas y Minerales (abril, 1997).

Sociedad Nuclear Española “El ciclo del combustible nuclear”. Sociedad Nuclear Española. 1997.

ENRESA “IV Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Gestión de Residuos Radiactivos”. Publicaciones Técnicas. (Terra Innova 2000).

IEE / CIEMAT-CSN “El ciclo del combustible nuclear. Aspectos de seguridad y protección”. Abril, 1999.

CIEMAT - UPM – ENRESA “Gestión de Residuos Radiactivos” Serie Ponencias (1995). (2 vol.). CIEMAT – UNESA “Protección radiológica aplicada a instalaciones nucleares” Serie Ponencias (1999).

Ayala, F.J.; Rodríguez, J.M. “Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros”. Instituto Geológico y Minero de España (1986).

IAEA “Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and their Remediation” Proceedings of an International Workshop Lisbon, 2004.

U.S. Department of Energy “Guidance for UMTRA Project Surveillance and Maintenance”. UMTRA-DOE/AL 350124 – Rev. 0 (January, 1986).

U.S. Department of Energy “Technical Approach Document”. UMTRA-DOE/AL 050425 - Rev. II (December, 1989).

Relación con otros temas de la oposición:

1^{er} ejercicio

A.9. La Ley de 29 de abril de 1964 sobre Energía Nuclear. Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. Régimen de autorizaciones de estas instalaciones: Inspección de las mismas. El personal de operación. Reglamentos sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes. El Plan básico de emergencia nuclear. La protección física de las centrales nucleares

B.1. Radiactividad natural. Series radiactivas. Isótopos. Radiactividad artificial. Estructura nuclear. Fuerzas nucleares. Estabilidad nuclear.

B.8. Residuos radiactivos. Tipos. Origen. Gestión.

D.11. Protección radiológica ambiental. Comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente.

D.12. Definición, clasificación y gestión de los residuos radiactivos sólidos

3^{er} ejercicio

B.9. Protección radiológica operacional en instalaciones del ciclo del combustible.

B.10. Protección radiológica durante el desmantelamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas. Restauración del emplazamiento antes de la clausura.

B.11. Seguridad y protección radiológica en las instalaciones de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos.

B.12. Protección radiológica frente a las fuentes naturales de radiación.

B.20. Efluentes radiactivos en instalaciones radiactivas. Sistemas de tratamiento. Limitación, vigilancia y control.

B.21. Evaluación del impacto radiológico ambiental. Declaración de Impacto Ambiental. Intervención del CSN.

B.26. Políticas y estrategias de gestión de residuos radiactivos en España. El Plan General de Residuos Radiactivos.

Figura 1: Primera parte del ciclo del combustible nuclear

Figura 2: Reservas y producción de uranio

Figura 3: Tipos de minería

Figura 4: Esquema de difusora de varias etapas.

Figura 5: Esquema de centrifugadora.

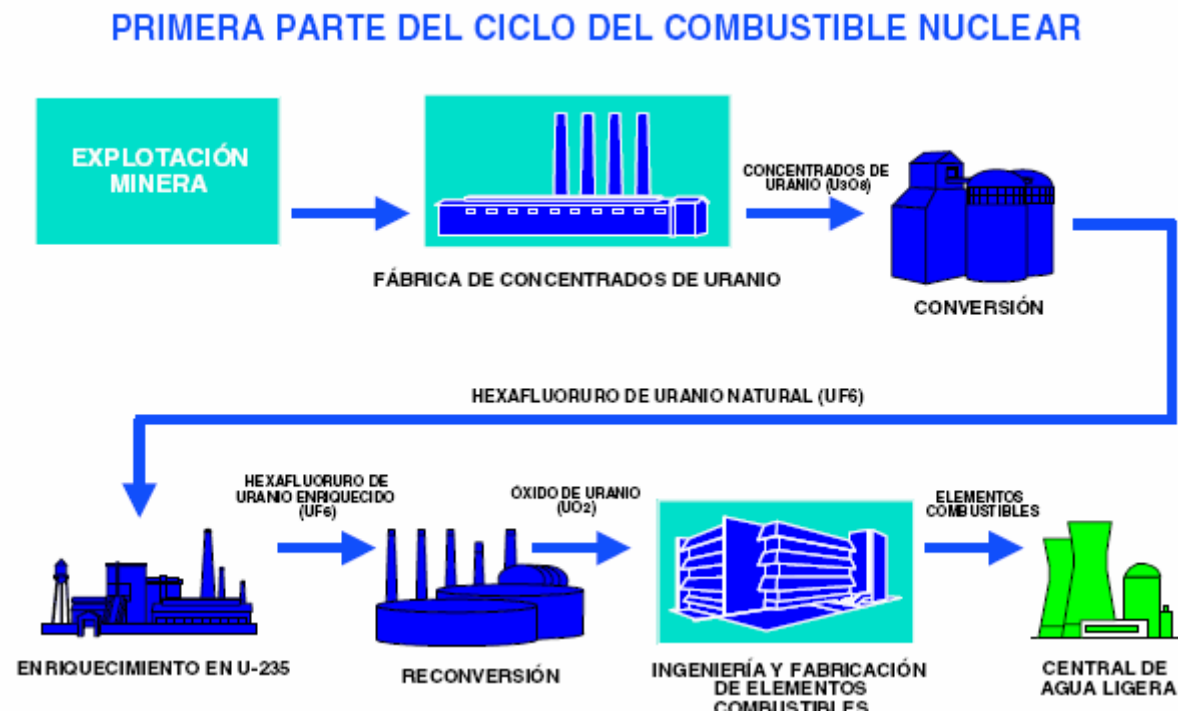


Figura 2

Shares of uranium resources and production

	Resources (%) [*]	Production (%) ^{**}	Production (tU) ^{**}
Australia	24.0	21	8 575
Canada	9.4	23	9 465
United States	7.2	4	1 700
Namibia	2.1	7	2 875
Niger	4.8	8	3 154
South Africa	7.2	1	535
Kazakhstan	17.2	16	6 655
Russian Federation	3.6	8	3 415
Uzbekistan	1.6	6	2 305
Ukraine	1.9	2	845
Others	21.0	4	1 676
Total	100.0	100	41 200

^{*} Identified resources recoverable at less than USD 130/kgU (2005 data).
^{**} 2007 estimates.

NEA Annual Report 2007

Figura 3

TIPOS DE MINERÍA

TIPO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
SUBTERRÁNEA O MINERÍA DE INTERIOR	<ul style="list-style-type: none"> Menor movimiento de tierras Menor impacto ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> Explotación más cara Mayor impacto radiológico Mayor riesgo y peores condiciones de trabajo Menor recuperación de reservas
CIELO ABIERTO	<ul style="list-style-type: none"> Utilización de equipos de gran tamaño Menor impacto radiológico Mejor recuperación de las reservas Utilización de explosivos vertibles y más seguros Explotación de yacimientos de baja ley 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor impacto ambiental Mayores movimientos de tierras Mayor relación E/M
LIXIVIACIÓN IN SITU	<ul style="list-style-type: none"> Coste de minería muy bajo (sondeos y bombeo) Permite explotar yacimientos de muy baja ley Impacto radiológico exterior nulo Escaso impacto visual 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere yacimientos muy especiales Menor recuperación de las reservas Exige un control muy riguroso de la operación para eliminar el posible impacto ambiental

Figura 4

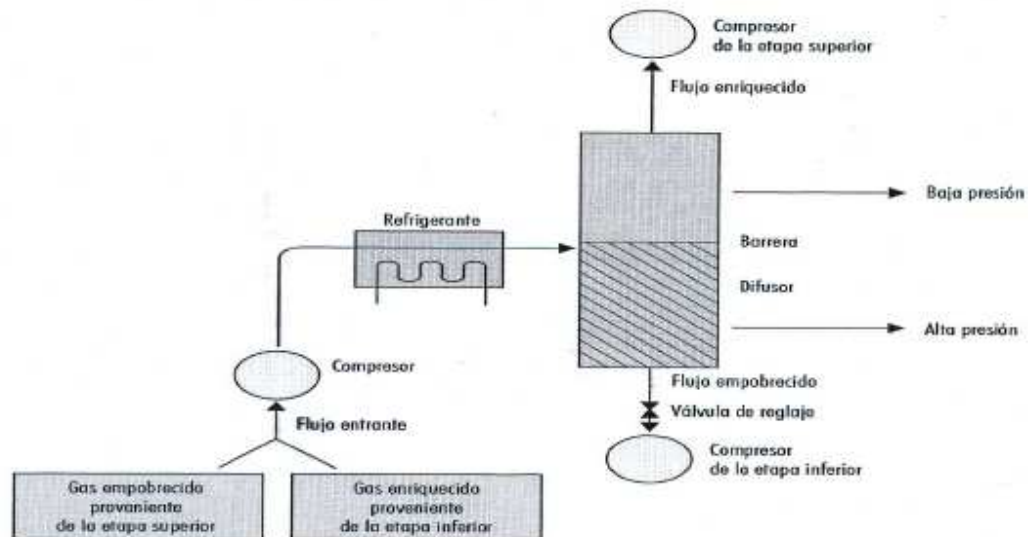


Figura 5

