

Optimización aplicada a la gestión del uranio en la Fábrica de Juzbado

Guillermo Sánchez*, Angel García, Ana Sacedón
 ENUSA Industrias Avanzadas S. A. <http://www.enusa.es>
 Fábrica de Juzbado. Apdo 328. E-37080 Salamanca
 (*) gsl@fab.enusa.es

Abstract

Uranium enriched price is mainly a function of the SWU and feed. SWU follows a non linear function. By blending uranium of different enrichments a loss of SWU is inevitable. We have developed some software to optimize the uranium management.

Resumen

La unidad de trabajo de separación (UTS) es uno de los parámetros que intervienen en la determinación del valor del uranio enriquecido. Tiene la particularidad de no ser lineal, como consecuencia de lo cual, en operaciones relacionadas con la valoración económica, no opera bajo la regla habitual de la adición (Ej.: si tengo N1 kgU de enriquecimiento e1 y N2 kgU de enriquecimiento e2, el valor económico de la suma de N1 + N2 es diferente al de N1 y N2 por separado). Este hecho debe tenerse en cuenta en la planificación de las actividades de la fábrica de Juzbado relacionadas con la gestión del uranio. Para facilitar esta labor hemos desarrollado una serie de aplicaciones informáticas que utilizan métodos de optimización. Estas herramientas pueden ser utilizadas tanto para la gestión diaria del uranio (ej.: mezclas de enriquecimiento) como para realizar simulaciones a medio y largo plazo (ej.: distribución futura óptima de los stock de la fábrica de Juzbado).

Fundamentos

El valor del uranio de un enriquecimiento e, Ue, en forma de UO₂, básicamente está compuesto por cuatro componentes:

- El coste de los kg de concentrado (uranio natural, como U₃O₈) necesarios para obtener el Ue. Normalmente el precio del concentrado se expresa en dolares/lb de U₃O₈.
- El coste de la conversión del U₃O₈ en UF₆ natural.
- El coste del enriquecimiento, que viene dado por las unidades trabajo de separación, UTS (o SWU en inglés), y su correspondiente coste, necesarias para obtener Ue a partir de uranio natural.
- Re-conversión, es el coste de transformación del UF₆ enriquecido en UO₂ enriquecido.

El coste del concentrado y el de la primera conversión (U₃O₈ → UF₆ nat) a veces se agrupan expresándose el precio en “kgU nat” o “feed”.

Los kg de concentrado y las UTS necesarios para obtener 1 kgUe dependen de la denominada cola, o grado de empobrecimiento del uranio que, como subproducto, se genera en el proceso del enriquecimiento. La cola normalmente la fija el comprador y se elige en función del precio de la UTS y del kg de U₃O₈. Los valores típicos de la cola oscilan entre 0.25% y 0.35% de U-235.

Las feed y UTS (o SWUe) necesarias para obtener 1 kgUe se obtienen como sigue:

$$F_{feed} = \frac{X_p - X_w}{X_f - X_w}$$

$$\text{Futs} = (2 X_p - 1) \text{Ln} \left(\frac{X_p}{1 - X_p} \right) - (2 X_w - 1) \text{Ln} \left(\frac{X_w}{1 - X_w} \right) - \frac{X_p - X_w}{X_f - X_w} \left((2 X_f - 1) \text{Ln} \left(\frac{X_f}{1 - X_f} \right) - (2 X_w - 1) \text{Ln} \left(\frac{X_w}{1 - X_w} \right) \right)$$

donde

X_p Fracción (o porcentaje) de U-235 en masa en el producto final (enriquecido). También lo denotamos por "e"

X_w Fracción (o porcentaje) de U-235 en masa en la cola (empobrecido)

X_f Fracción (o porcentaje) de U-235 en masa en la alimentación, típicamente es uranio natural cuyo contenido en U-235 es 0.711% en peso.

El conjunto de los componentes que constituyen el coste del uranio son lineales salvo el de la UTS que viene dada por la expresión antes indicada. La consecuencia de ello es que las operaciones que forman el coste del

uranio natural no son lineales. Por ejemplo: El coste de 2 tU enriquecido al 3% no es la suma del coste de 1tU enriquecida al 2% más el de 1 tU enriquecida al 4%, aunque si mezclo 1 tU del 2% con 1 tU al 4% obtendré 2 tU al 3%. Esta idea hace que las operaciones con el uranio sean poco intuitivas.

Los algoritmos de optimización utilizados son los incluidos en el programa Mathematica, que permiten programación simbólica como por ejemplo:

```
In[4]:= NMinimize[{(x - 1/3)^2 + (y - 1/3)^2, x ∈ Integers}, {x, y}]
```

```
Out[4]:= {0.111111, {x → 0, y → 0.333333}}
```

Para la búsqueda de óptimos se dispone de los algoritmos más novedosos, tales como: DifferentialEvolution (genético), el Simplex que aplica el metodo Nelder-Mead; el RandomSearch (que utiliza métodos de Montecarlo)

Para facilitar la gestión del uranio hemos desarrollado programas informáticos de optimización que incorporan las ideas expuestas.

La aplicación informática

La aplicación está desarrollada para permitir su ejecución desde un navegador como IE Explorer, dentro de la intranet de ENUSA. Incluye un conjunto de utilidades que incorporaran

algoritmos de optimización lineal y no lineal. El programa está realizado en *Mathematica* (programa de cálculo simbólico que permite programación funcional) y la conexión y presentación en web utiliza Java y *webMathematica*.

Las utilidades más destacadas son las siguientes:

Coste del uranio enriquecido

(Ilustración 1).- Calcula el precio del uranio tanto para un enriquecimiento concreto como para un conjunto de enriquecimientos. El cálculo lo puede realizar utilizando, además del precio de la UTS, el precio del concentrado y de la conversión (U_3O_8 a UF_6 natural) o el de la feed (kg U-nat).

Cálculo coste del uranio

Aquí se calcula el coste del uranio a partir de los precios de la UTS (o SWU), y de la feed (kg U, como UF6 natural). Estos valores usualmente son los recogidos en los contratos. Los precios de mercado spot pueden obtenerse en http://www.uxc.com/review/uxc_prices.html

Entre los enriquecimientos (en %U) y kg de U de cada enriquecimiento (m), con el siguiente formato {{e1, m1}, {e2, m2}, ...}
 (Nota: si desea el precio por kg U de un único enriquecimiento "e", escribir {{e, 1}}, ej: {{0.044, 1}}):
 {{0.044, 1200}, {0.036, 3000}, {0.028, 2000}}

Cola (en % wt): Precio de la UTS (\$/SWU): Precio de la feed (\$/kg U como UF6 natural):

results

Enrq(% U-235)	kg U	SWU	Feed (kg U-nat)	Valor
4.4	1200	7246.8	11971.2	1.49507×10^6
3.6	3000	13575.	24087.	2.89752×10^6
2.8	2000	6132.	12166.	1.3838×10^6
Total	6200	26953.8	48224.2	5.77639×10^6

Nota: El resultado muestra las UTS, feed y costes del uranio para los datos introducidos. Las UTS y la feed están calculadas redondeando a 3 cifras decimales según criterio USEC [Pulse aquí](#) para obtener información de ayuda

Ilustración 1

Enriquecimientos equivalentes (Ilustración 2).- Esta función permite calcular enriquecimientos equivalentes con la condición de que el uranio inicial tenga el mismo valor económico que el uranio final. Por ejemplo: Supongamos que disponemos en existencias cantidades para abastecer total o parcialmente el diseño de una recarga

concreta y deseamos recibir unas cantidades de valor económico equivalente pero en otros enriquecimientos. El programa permite calcular las cantidades a intercambiar para que el valor económico sea el mismo.

Uranio - Microsoft Internet Explorer provided by ENUSA Industrias Avanzadas S.A.

Archivo Edición Ver Favoritos Herramientas Ayuda

Dirección <http://oias:8080/webMatematica/ENUSA/uranio05.jsp> Ir

Vínculos

Enriq. y kg de U iniciales: {{.016, 268}, {.02, 1233}, {.024, 1338}, {.028, 1932}, {.032, 5157}, {.036, 2836}, {.0395, 7610}, {.044, 2676}}

Cantidades recargas anteriores pendientes compensar: UTS: Feed:

Enriq. y kg de U finales: {{.024, 1500}, {.032, 3000}, {.036, 3000}, {.0395, 6000}, {.044, 4500}, {.049, 1500}}

Enriq. a ajustar: El programa nos indicara para ese enriquecimiento la masa en kg U que verifica la condición de uranio equivalente.

Cola (en % wt U-235): Precio de la UTS (\$/SWU): Precio de la feed (\$/kg U como UF6 natural):

results

Cantidades iniciales y compensaciones pendientes

Enriq(% U-235)	kg U	SWU	Feed, kg U-nat	Valor
1.6	268	286.838	847.689	78175.
2.	1233	2092.99	5100.	510729.
2.4	1338	3167.24	6836.5	724404.
2.8	1932	5924.23	11751.8	1.29802 × 10 ⁶
3.2	5157	19531.7	36387.6	4.1498 × 10 ⁶
3.6	2836	12833.6	22770.8	2.66409 × 10 ⁶
3.95	7610	39434.5	67582.7	8.05484 × 10 ⁶
4.4	2676	16159.2	26694.9	3.24573 × 10 ⁶
Compensación	n.a	6000	-8000	220000.
Total	23050	105430.	169972.	2.09458 × 10 ⁷

Cantidades finales

Enriq(% U-235)	kg U	SWU	Feed, kg U-nat	Valor
2.4	1500	3550.72	7664.23	812112.
3.2	3000	11362.2	21167.9	2.41408 × 10 ⁶
3.6	3000	13575.8	24087.6	2.81815 × 10 ⁶
3.95	6000	31091.6	53284.7	6.35073 × 10 ⁶
4.4	4500	27173.6	44890.5	5.45807 × 10 ⁶
4.9	1500	10505.7	16788.3	2.07899 × 10 ⁶
3.	1373.5	4703.6	9023.02	1.01366 × 10 ⁶

Listo Intranet local

Ilustración 2

Mezcla óptimas (Ilustración 3).- Hemos visto que el precio del uranio, para un enriquecimiento determinado, viene dado por varios componentes. La UTS es una función no lineal tal que si utilizamos varios enriquecimientos y cantidades de partida $\{\{E_1, C_1\}, \{E_2, C_2\}, \dots, \{E_n, C_n\}\}$ para obtener, por mezclas, otros enriquecimientos y cantidades $\{\{E_1', C_1'\}, \{E_2', C_2'\}, \dots, \{E_m', C_m'\}\}$ hay una pérdida en el valor económico del uranio, pues las UTS del uranio de partida son siempre mayores que las del uranio obtenido. El

programa calcula las mezclas a realizar minimizando las perdidas de UTS. Como datos de entrada se introducen los enriquecimientos y cantidades disponibles para su uso en mezclas y las cantidades y enriquecimientos que se desean obtener. Puede utilizarse, por ejemplo, para comprobar si con las existencias disponibles puede fabricarse una recarga determinada y, en caso afirmativo, indica las mezclas a realizar.

Mezclas de enriquecimiento con mínimas pérdidas de UTS

Esta función calcula las mezclas a realizar para obtener determinadas cantidades de distintos enriquecimientos a partir de las cantidades y enriquecimientos de partida que se indiquen. Las mezclas están calculadas para minimizar las pérdidas de UTS. las pérdidas de UTS no depende de la cola.

Entre las cantidades que desea obtener {enriq.(%) , masa en kg U}:

```
{{0.032, 3000}, {0.044, 2000}, {0.016, 300}}
```

Entre las cantidades que dispone {enriq.(%) , masa en kg U}:

```
{{0.0071, 1000}, {0.02, 1000}, {0.036, 1000}, {0.04, 1000}, {0.047, 1000}, {0.049, 1000}}
```

Evaluate

results

Enriq.	3.2%	4.4%	1.6%	Total	Sobra
0.71 %	175.439	32.9241	218.845	427.208	572.792
2. %	1000.	0	0	1000.	0
3.6 %	1000.	0	0	1000.	0
4. %	0	918.845	81.155	1000.	0
4.7 %	824.561	175.439	0	1000.	0
4.9 %	0	872.792	0	872.792	127.208

El resultado muestra las pérdidas de UTS para la mezcla óptima y las cantidades a mezclar. Si no se obtiene un resultado es que las mezclas no son posibles, en ese caso habrá que repetir el procedimiento incrementando los enriquecimientos de partida o disminuyendo los enriquecimientos y/o las cantidades finales

Ilustración 3

Balances de uranio.- El programa calcula el balance en feed y UTS como diferencia entre las cantidades entregadas por el cliente y las que le son suministradas en forma de elementos

combustibles. Tiene en cuenta el saldo pendiente de recargas anteriores y las pérdidas de fabricación y cola aplicable.

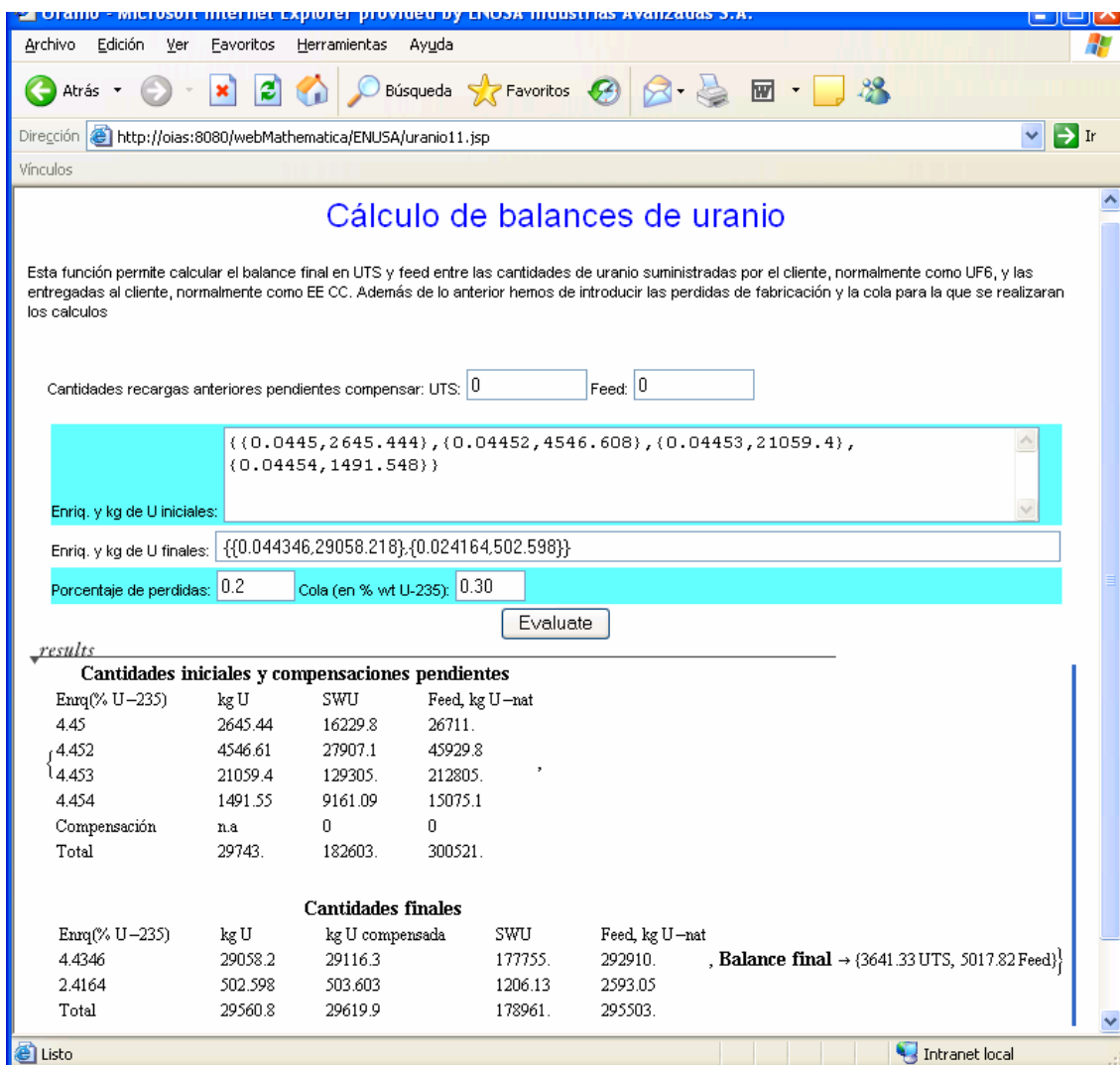


Ilustración 4

Conclusiones

Una gestión eficiente del uranio requiere métodos específicos de optimización. Con tal fin se ha desarrollado en la Fábrica de Juzbado un conjunto de utilidades informáticas que facilitan la gestión de los stocks de U y que se integran, mediante acceso a través de un navegador web, en el conjunto de utilidades que ofrece la

plataforma Infocentro de ENUSA. En una segunda fase, como parte del desarrollo futuro de las aplicaciones ahora disponibles, se contempla conectarlas con las bases de datos disponibles en ENUSA.