

ASUNTO: SNE II Combustible

Título: Optimización de mezclas de enriquecimiento

Autores: Guillermo Sánchez (Email: gsl@fab.enusa.es) y Oscar Zurrón
ENUSA Industrias Avanzadas S. A. <http://www.enusa.es>
Fábrica de Juzbado. Apdo 328. E-37080 Salamanca
Tfno (34) 923 329 753 Fax.: (34) 923 321369

Abstract

Uranium enriched price is mainly a function of the SWU and feed. SWU follow a non linear function. Blending uranium of different enrichments a loss of the SWU is inevitable. We have developed a program and a few criteria for minimize these costs.

Resumen

El precio del uranio, para un enriquecimiento determinado, viene dado por varios componentes, el de mayor peso suele ser la unidad de trabajo de separación (UTS). La UTS es una función no lineal tal que si utilizamos varios enriquecimientos y cantidades $\{\{E_1, C_1\}, \{E_2, C_2\}, \dots, \{E_n, C_n\}\}$ de partida 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. Además la propia realización de la mezcla implica un trabajo adicional (operación de mezclado, análisis, etc.). Las mezclas a veces son inevitables, hay que contemplar los extracostes. Estos pueden reducirse eligiendo adecuadamente las cantidades y enriquecimientos a mezclar. El empleo de técnicas de optimización permiten minimizar estos costes. En la fabrica de Juzbado hemos desarrollado programas de optimización muy sofisticados, las conclusiones que se sacan son sorprendentemente simples y de fácil aplicación práctica

Fundamentos

El valor del uranio enriquecido, como UF₆, básicamente está compuesto por tres factores:

- a) El trabajo de separación isotópica que se expresa en unidades técnicas de separación, UTS (o SWU en inglés).
- b) Concentrado (U₃O₈) de uranio natural de partida (si se expresa en kg U suele llamársele *feed*) necesario para obtener el enriquecimiento deseado.
- c) Primera conversión, es el coste de transformación de U₃O₈ natural a UF₆ natural (operación previa al enriquecimiento)

Los factores anteriores dependen de la denominada cola, o grado de empobrecimiento del uranio que como subproducto que 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. El coste total CU_e de compra de 1 kg de enriquecimiento “e” está dado por la eq.1

$$CU_e = 1.1792 \left(\frac{\text{kg U3O8}}{\text{kg U}} \right) \times N_{\text{feed}} (\text{kg U}) \times 2.2046 \left(\frac{\text{lb}}{\text{kg}} \right) P_{\text{Conc}} \left(\frac{\text{dolares}}{\text{lb U3O8}} \right) +$$

$$N_{\text{feed}} (\text{kg U}) \times P_{\text{Conv}} \left(\frac{\text{dolares}}{\text{kgU}} \right) + SW_e (SWU) \times PSW \left(\frac{\text{dolares}}{\text{SWU}} \right)$$

eq 1

CU_e	Coste 1 kg U, como UF6 a enriquecimiento e fijada una cola w.
N_{feed}	kg de U-natural como U necesario para obtener 1 kg a para una cola w.
1.1792	factor de conversion de kg de U a kg U3O8
P_{Conc}	Precio 1 lb de U3O8
2.2046	Factor de conversion de kg a lb
P_{Conv}	Precio kg U, convertido de U3O8 a UF6
SW_e	UTS necesarias para obtener 1 kg a para una cola w.
PSW	Precio UTS

Todos los precios se dan en dólares. La expresión anterior podemos simplificarla y resulta

$$CU_e = N_{\text{feed}} (2.59966432 P_{\text{Conc}} + P_{\text{Conv}}) + SW_e PSW$$

eq 2

Las feed y UTS necesarias para obtener 1 kg U de enriquecimiento “e” se obtienen como sigue:

$$N_{\text{feed}} = \frac{X_p - X_w}{X_f - X_w}$$

eq 3

$$SW_e = \frac{\left((2 X_p - 1) \text{Log} \left[\frac{X_p}{1 - X_p} \right] - (2 X_w - 1) \text{Log} \left[\frac{X_w}{1 - X_w} \right] \right) - \left((2 X_f - 1) \text{Log} \left[\frac{X_f}{1 - X_f} \right] - (2 X_w - 1) \text{Log} \left[\frac{X_w}{1 - X_w} \right] \right) (X_p - X_w)}{X_f - X_w}$$

eq 4

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.

Para el UO2 enriquecido hemos de tener en cuenta además el coste de la segunda conversión (transformación de UF6 enriquecido a UO2), este es independiente de la cola pues se parte de un producto ya enriquecido.

Mezclas de enriquecimiento

La gestión del uranio necesario para la fabricación elementos combustibles requiere a veces la realización de mezclas de enriquecimientos lo que origina unos costes usualmente asumidos por el fabricante. Las causas principales de estos costes son:

Perdidas de UTS.- Si deseamos obtener N kg de U de enriquecimiento e por mezcla de $N1$ kg de U de enriquecimiento $e1$ y $N2$ kg de U de enriquecimiento $e2$ ($N = N1+N2$), obtenemos de la eq. 2 (en la que sustituimos N_{feed} y SWE por las eq.3 y eq.4) que:

$$CU_e < CU_{e1} + CU_{e2}$$

La causa de esto es la no linealidad del término SWE . Es decir. Si realizamos una mezcla inevitablemente tendremos pérdidas de UTS (no así de feed)

$$\Delta UTS = UTS_e - (UTS_{e1} + \dots + UTS_{en})$$

UTS_e indican las UTS necesarias para obtener un enriquecimiento e sin mezclas

UTS_{e_i} indican las UTS necesarias par obtener un enriquecimiento e_i .

En la figura 1 se ve la importancia de estas pérdidas (Para valorarlas económicamente orientativamente se puede hacer la aproximación 1 UTS = de 100-110 \$)

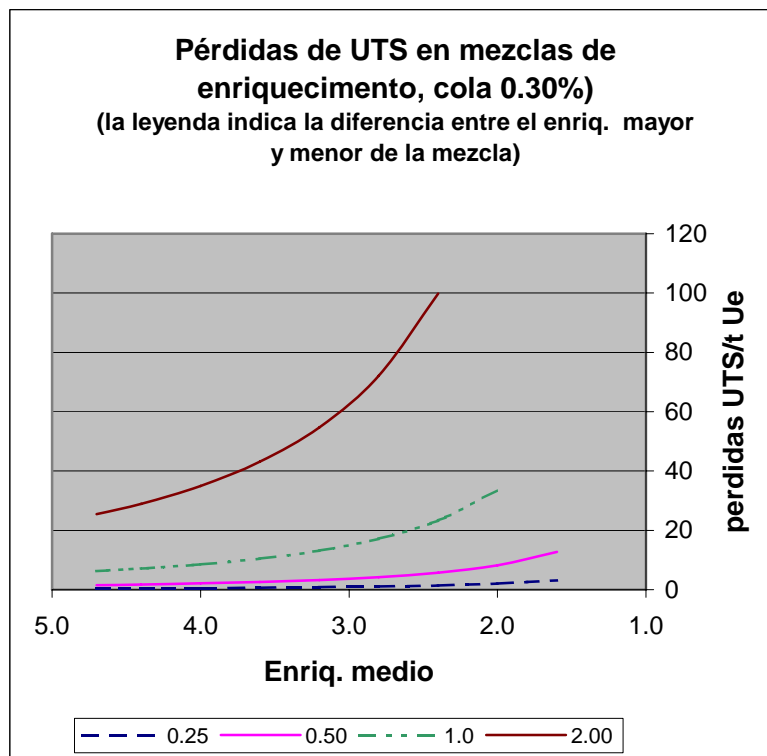


Figura 1.- Pérdidas de UTS por tU, en función del enriquecimiento medio y extremos utilizados en la mezcla

Costes de realización de la mezcla.- También hemos de tener en cuenta los costes inherentes a la propia realización física de la mezclas (operación de mezclado, análisis, etc.).

Optimización de mezclas de enriquecimiento

Hemos visto que el precio del uranio, para un enriquecimiento determinado, viene dado por varios componentes, el de mayor peso suele ser la unidad de trabajo de separación (UTS). La UTS es una función no lineal tal que si utilizamos varios enriquecimientos y cantidades $\{\{E_1, C_1\}, \{E_2, C_2\}, \dots, \{E_n, C_n\}\}$ de partida 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. A veces el problema que se plantea es conseguir las cantidades máximas posibles de determinados enriquecimientos.

El empleo de técnicas de optimización permiten minimizar estos costes. Para tal fin hemos desarrollado un programa del que aquí mostramos algunos ejemplos:

Ejemplo 1.- Dadas las siguientes cantidades y enriquecimientos $\{\{1500,2\}, \{1500,2.40\}, \{3000,2.8\}, \{6000,3.6\}, \{3000,3.95\}, \{3000,4.4\}, \{6000,4.45\}, \{10000,4.7\}, \{5841.31, 4.9\}\}$, se trata de determinar la mezcla óptima necesaria para obtener 27 t U al 4%.

Entrada al programa:

```
optimaBlending[{0.04, 27000},
  {{0.02, 0.024, 0.028, 0.036, 0.0395, 0.044, 0.0445,
    0.047, 0.049}, {1500, 1500, 3000, 6000, 3000, 3000,
    6000, 10000, 5841}}, {u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7, u8, u9}]]
```

Solución: Nos indican las pérdidas mínimas que podemos conseguir y las cantidades que hemos de mezclar para conseguirlas

```
{449.378, {u1 → 0, u2 → 847.826, u3 → 3000., u4 → 6000.,
  u5 → 3000., u6 → 3000., u7 → 6000., u8 → 5152.17, u9 → 0}}
```

Ejemplo 2.- La siguiente expresión permite obtener la máximas cantidades de uranio que se pueden obtener para una distribución de enriquecimientos y kg de dichos enriquecimientos: $\{0.02, 0.028, 0.036, 0.0445, 0.047, 0.049\}, \{3000, 3000, 6000, 8000, 14000, 5261\}$

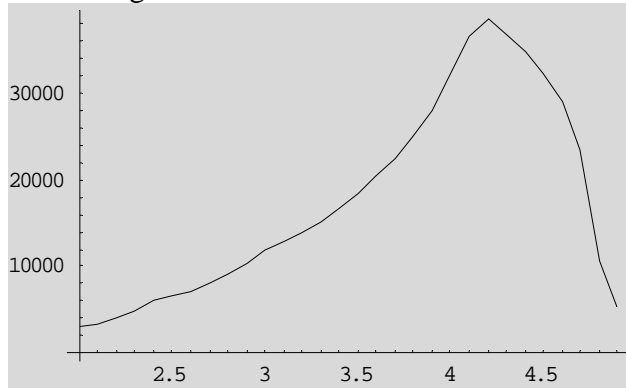
Entrada al programa

```

maxQ[enr_] :=
  First[maximumQuantity[{enr / 100},
    {{0.02, 0.028, 0.036, 0.0445, 0.047, 0.049},
    {3000, 3000, 6000, 8000, 14000, 5261},
    {u1, u2, u3, u4, u5, u6}}]]

```

Solución gráfica



Conclusiones

La adecuación a las necesidades de los clientes obliga a la fabrica de Juzbado a disponer de un gran número de enriquecimientos. Los clientes BWR usualmente ponen menos enriquecimientos de los de diseño pues de algunos enriquecimientos utilizan cantidades muy pequeñas que encarecen otras operaciones como son el transporte. Además, existe un aumento continuo del enriquecimiento medio de las recargas, especialmente las PWR. La causas anteriores obligan a realizar mezclas de enriquecimiento que implican perdidas de UTS y del trabajo añadido que implica realizar mezclas. Estas perdidas se procura minimizar para lo que se han desarrollado algunos algoritmos específicos muy sofisticados. Sin embargo pueden darse criterios muy simples para disminuir las perdidas por mezclas (véase figura 1):

- a) Las mezclas en enriquecimientos bajos hay que evitarlas
- b) Las mezclas deben realizarse utilizando enriquecimientos lo más próximas posibles