OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DE ABASTECIMIENTO DE MATERIA PRIMA (UO_2) A UNA FÁBRICA DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES NUCLEARES

Rubén García Sánchez*[1] y Guillermo Sánchez de León*

* Departamento de Planificación, Componentes y Uranio. ENUSA Industrias Avanzadas, S.A.

Carretera Salamanca-Ledesma, km 26; 37115 Juzbado (Salamanca)

1. INTRODUCCIÓN

Más de las tres cuartas partes del valor total de un elemento combustible corresponden al uranio enriquecido. Son, por tanto, fundamentales los desarrollos relacionados con la logística del suministro de esta materia prima dentro del campo de la fabricación de combustible nuclear.

Centrándonos de forma particular en el caso de ENUSA Industrias Avanzadas S.A., podemos distinguir en este ámbito dos grandes áreas bien definidas: la cadena de suministro, que se inicia con el aprovisionamiento del uranio natural hasta la obtención del UF_6 enriquecido, y la parte que comprende desde el anterior compuesto hasta que se produce el envío del combustible al cliente. Así mismo, para conseguir un óptimo funcionamiento de las anteriores fases se requiere una coordinación de todos los agentes intervinientes: clientes, suministradores de servicios (acopios de materias primas, conversión, enriquecimiento y reconversión), los diferentes departamentos implicados de ENUSA y las empresas con las que establece acuerdos comerciales.

En esta ponencia nos centramos en la optimización de un eslabón concreto de la cadena: el proceso que transcurre desde la disponibilidad de UF_6 enriquecido hasta la llegada a la fábrica de UO_2.

El alcance de este estudio se encuentra acotado por una de las decisiones que debe ser considerada en la optimización de la planificación de una red de suministro en su etapa de aprovisionamiento (Erengüç, Simpson y Vakharia, 1999): ¿cuál es el volumen y la frecuencia de los envíos desde cada uno de los suministradores? Se traspasa así el concepto de cadena de suministro global *(supply chain)* para trabajar sobre la cadena local de logística de aprovisionamiento *(inbound logistics)*.

2. MODELO PROPUESTO

Dentro del ciclo nuclear vamos a presentar un modelo de optimización de la logística de aprovisionamiento de UO_2 entre la instalación del reconvertidor (en la que se transforma el material en forma de UF_6 enriquecido al compuesto químico UO_2) y una fábrica de conjuntos combustibles (Figura 1). El UF_6 es suministrado en cilindros de distintos enriquecimientos del isótopo U-235 desde varios enriquecedores a los reconvertidores, donde el UF_6 se convierte en UO_2.

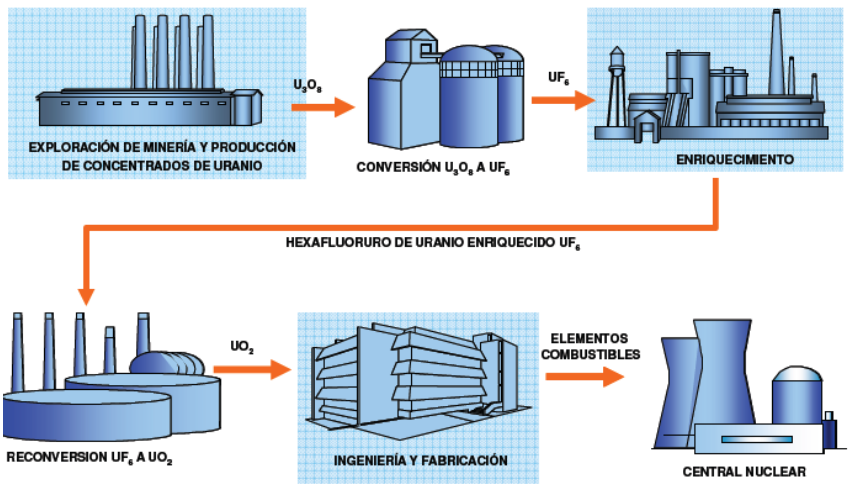

Figura 1. Primera parte del ciclo del combustible nuclear

[1] Tfno. 923 329 815; fax: 923 329 745; email: gsr@fab.enusa.es.

Dentro de la teoría de la optimización matemática, los modelos de programación lineal entera mixta *(Mixed Integer Linear Programming, MILP)* proporcionan una rigurosa aproximación al análisis de la cadena de suministro (Shapiro, 2007). De hecho, al mismo tiempo que ponen en juego las opciones más importantes de decisión, restricciones y objetivos para resolver su diseño, los métodos de resolución son capaces a su vez de encontrar soluciones de rápida convergencia gracias a la simplicidad de las ecuaciones que definen el problema. Se trata de una generalización de los modelos más comunes de programación lineal en los que algunas variables, llamadas variables enteras, sólo pueden tomar valores enteros no negativos, mientras que el resto, llamadas continuas, simplemente se restringe su dominio a no ser negativo.

Comenzaremos por definir las unidades del proceso objeto de la optimización (Figura 2). De una parte, disponemos del origen y del destino del movimiento de materiales y, por otra parte, del propio transporte entre los mismos (un único operador logístico).

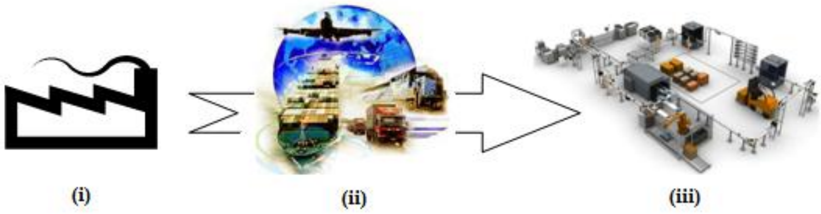

Figura 2. Partes del modelo: (i) suministrador, (ii) operador logístico y (iii) fábrica de montaje

Los contratos normalmente establecen limitaciones en términos de plazos y cantidades. Una vez que el material esta como $UO_{2,}$ es necesario trasportarlo a la instalación de montaje (un único suministrador de componentes y una única fábrica de elementos combustibles).

Las cantidades del UO_2 por enriquecimiento no tienen por qué coincidir con las de $UF_{6,}$ ya que cabe la posibilidad de realizar mezclas de enriquecimiento. Por simplicidad, en esta ponencia no las vamos a considerar, ya que constituye una parte muy pequeña del total reconvertido.

Dividiremos cada uno de los i-ésimos tipos de pastillas de UO_2 a producir en la fábrica de montaje en varias λ órdenes de fabricación distintas: para el tipo de pastilla i = 1 establecemos cuatro consumos de polvo de UO_2 (λ = 4) distribuidos en el tiempo, las semanas j igual a 4, 8, 15 y 21. A su vez, el suministrador de dicha materia prima a lo largo de un número j de periodos recibirá UF_6 enriquecido en el isótopo U-235 correspondiente. Ahora bien, estas recepciones también pueden no coincidir en el tiempo, por lo que se les asigna una orden de expedición mediante el índice ϕ, por ejemplo: dos recepciones de UF_6 (ϕ = 1 y ϕ = 2) durante las semanas 4 y 8 (j = 4 y j = 8) necesario para la fabricación de un tipo de pastillas i.

2.1. Notación y definición de las variables de decisión

2.1.1. Índices

Trabajaremos con los siguientes cuatro tipos de índice:

- $i = \{1, \dots, n\}/i \in \mathbb{Z}$: tipo de enriquecimiento del isótopo U-235.
- $j = \{1, \dots, m\}/j \in \mathbb{Z}$: número de la semana en la que se convierte, envía o consume material.
- $\phi = \{1, \dots, q_i\}/\phi \in \mathbb{Z}$: número de entregas de UF_6 de un mismo enriquecimiento i.
- $\lambda = \{1, \dots, r_i\}/\lambda \in \mathbb{Z}$: número de consumos de UO_2 cuyo enriquecimiento es i.

2.1.2. Horizonte temporal

El modelo planteado permite utilizar distintos nivel de agregación temporal dependiendo del detalle y proyección (H_t) elegidos. En nuestro caso, el número de unidades temporales es m semanas.

2.1.3. Costes

Vamos a contemplar tres tipos de coste teniendo en cuenta el punto de vista de la planificación colaborativa en la cadena de suministro:

- Coste de reconversión de UF_6 en UO_2 del enriquecimiento i-ésimo de U-235, la semana j-ésima, cuya recepción es la ϕ-ésima y consumo el λ-ésimo ($CS_{ij\phi\lambda} = k_1 \cdot j$ en unidades monetarias por tonelada equivalente de U). Permite establecer la prioridad de transformación.
- Coste de transporte de polvo de UO_2, con enriquecimiento i-ésimo, durante la semana j-ésima, cuya recepción es la ϕ-ésima para el consumo λ-ésimo ($CT_{ij\phi\lambda} = k_2$ en unidades monetarias por tonelada equivalente de U transportada).
- Coste de posesión o almacenamiento del material i-ésimo a partir de la semana j-ésima, cuya recepción es la ϕ-ésima para el consumo λ-ésimo ($CW_{ij\phi\lambda} = k_3 \cdot (m-j+1)$ en unidades monetarias por tonelada equivalente de U y semana). Está formado, a su vez, por el coste financiero correspondiente a la suma invertida en la cantidad de producto almacenado más el coste de mantenimiento del almacén $w_{i\lambda}-j-1-d_2$ semanas.

2.1.4. Parámetros

Se han considerado los siguientes factores cruciales del proceso (las unidades de las magnitudes referidas a masas de UF_6 y UO_2 vienen expresadas en toneladas equivalentes de U):

- SS_{0i}: stock inicial de UO_2 procesado del enriquecimiento i en el suministrador.
- FS_{0i}: stock inicial de UO_2 del enriquecimiento i en la fábrica.
- SFS_i: stock estratégico mínimo estimado de UO_2 del enriquecimiento i en la fábrica.
- $v_{i\phi}$: semana en la que llega el UF_6 cuyo orden de recepción es ϕ para producir el UO_2 del enriquecimiento i.
- $w_{i\lambda}$: semana de fabricación de pastillas de UO_2 del enriquecimiento i y cuyo orden de consumo es λ.
- $a_{ij\phi}$: UF_6 del enriquecimiento i-ésimo recibido en la j-ésima semana cuyo orden de recepción es ϕ.
- $z_{ij\lambda}$: cantidad de pastillas de UO_2 del enriquecimiento i-ésimo en la j-ésima semana cuyo orden de consumo es λ.
- $CR_{ij\phi\lambda}$: factor de penalización auxiliar de la función objetivo para operar con las variables binarias b_j y $e_{i\phi}$. Su valor es $k_1 \cdot j + k_3 \cdot (m-j+1)$.
- d_1: semanas de almacenamiento del polvo de UO_2 en la fábrica antes de consumo.
- d_2: semanas de transporte del UO_2 entre el reconvertidor y la fábrica.
- d_3: semanas de almacenamiento del polvo de UO_2 tras la conversión en las instalaciones del reconvertidor antes del envío.

También es necesario fijar las capacidades mínima y máxima del transporte en toneladas equivalentes de U por semana:

- α: capacidad mínima de transporte.
- β: capacidad máxima de transporte.
- γ: tasa máxima de conversión de UF_6 en UO_2.

2.1.5. Variables de decisión

Se han elegido las siguientes cinco variables de decisión:

- $x_{ij\phi\lambda}$: cantidad de UF_6 en toneladas equivalentes de U a transformar por el suministrador del enriquecimiento i-ésimo de U-235, recibido en la j-ésima semana, cuyo orden de recepción es ϕ y de consumo del UO_2 producido es λ.
- $y_{ij\phi\lambda}$: cantidad de UO_2 en toneladas equivalentes de U que tras ser procesado es transportado partiendo la j-ésima semana desde el reconvertidor al fabricante del enriquecimiento i-ésimo de U-235, con un orden de recepción ϕ del UF_6 y de consumo del UO_2 λ-ésimo.
- $ss_{ij\phi\lambda}$: cantidad de UO_2 en toneladas equivalentes de U del enriquecimiento i-ésimo que estaba procesado y almacenado inicialmente en las instalaciones del suministrador y que parten hacia el fabricante la j-ésima semana, con un orden de recepción ϕ del UF_6 y de consumo del UO_2 λ-ésimo.
- b_j: variable binaria que toma el valor 1 si existe envío de UO_2 en tránsito durante la semana j-ésima y 0 en caso contrario.
- $e_{i\phi}$: variable binaria con valor 1 si el enriquecimiento i-ésimo de UF_6 cuya recepción es la ϕ-ésima saturaría la tasa de transformación (γ) de UF_6 a UO_2; es 0 en caso contrario.

2.2. Formulación

La formulación del modelo propuesto es la siguiente:

min $$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}\left[\left(CT_{ij\phi\lambda}+CW_{ij\phi\lambda}\right)\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)+CR_{ij\phi\lambda}\left(b_j+e_{i\phi}\right)+CS_{ij\phi\lambda}x_{ij\phi\lambda}\right] \quad (1)$$

s.a. $$\sum_{i=1}^{n}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)\leq \beta b_j \quad \forall \boldsymbol{j}\in \boldsymbol{J} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)\geq \alpha b_j \quad \forall \boldsymbol{j}\in \boldsymbol{J} \quad (3)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}x_{ij\phi\lambda}\leq \gamma e_{i\phi}+a_{aj\phi}\left(1-e_{i\phi}\right) \quad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi}\,/\,\boldsymbol{i}\in \boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in \boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in \boldsymbol{Q}_i \quad (4)$$

$$a_{ij\phi}\left(1-e_{i\phi}\right)\leq \gamma\left(1-e_{i\phi}\right) \quad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi}\,/\,\boldsymbol{i}\in \boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in \boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in \boldsymbol{Q}_i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}x_{ij\phi\lambda}\leq \gamma \quad \forall \boldsymbol{j}\in \boldsymbol{J} \quad (6)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{j=1}^{v_{i\phi}+1}x_{ij\phi\lambda}=0 \quad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{\phi}\,/\,\boldsymbol{i}\in \boldsymbol{I},\boldsymbol{\phi}\in \boldsymbol{Q}_i \quad (7)$$

$$\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{j=w_{i\lambda}-d_1-d_2}^{m}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)=0 \quad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{\lambda} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{\lambda}\in\boldsymbol{R}_i \tag{8}$$

$$y_{ij\phi\lambda}\leq\sum_{\sigma=1}^{j}x_{i\sigma\phi\lambda}-\sum_{\sigma=1}^{j-1}y_{i\sigma\phi\lambda} \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\lambda} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in\boldsymbol{Q}_i,\boldsymbol{\lambda}\in\boldsymbol{R}_i \tag{9}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}-d_1-d_2}y_{ij\phi\lambda}\leq\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}-d_1-d_2}x_{i\sigma\phi\lambda} \qquad \forall \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I} \tag{10}$$

$$z_{iw_{i\lambda}\lambda}\leq\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}-d_1-d_2}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)+FS_{0i}-SFS_i \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{\lambda} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{1} \tag{11}$$

$$z_{iw_{i\lambda}\lambda}\leq\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}-d_1-d_2}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)+FS_{0i} \qquad \forall i,\lambda / i\in I,\lambda\in\left[2,r_i\right] \tag{12}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}}z_{ij\lambda}\leq\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{j=1}^{w_{i\lambda}-d_1-d_2}\left(y_{ij\phi\lambda}+ss_{ij\phi\lambda}\right)+FS_{0i}-SFS_i \qquad \forall \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I} \tag{13}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{j=1}^{m}x_{ij\phi\lambda}\leq\sum_{j=1}^{m}a_{ij\phi} \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{\phi} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{\phi}\in\boldsymbol{Q}_i \tag{14}$$

$$\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_1}\sum_{j=1}^{v_{i\phi}+1+d_3}y_{ij\phi\lambda}=0 \quad \forall \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I} \tag{15}$$

$$ss_{ij\phi\lambda}\leq SS_{0i} \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\lambda} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in\boldsymbol{Q}_i,\boldsymbol{\lambda}\in\boldsymbol{R}_i \tag{16}$$

$$\sum_{\phi=1}^{q_i}\sum_{\lambda=1}^{r_i}\sum_{j=1}^{m}ss_{ij\phi\lambda}\leq SS_{0i} \quad \forall \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I} \tag{17}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{r_i}x_{ij\phi\lambda}\leq\sum_{\sigma=1}^{j-d_3-2}a_{i\sigma\phi} \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in\boldsymbol{Q}_i \tag{18}$$

$$y_{ijk}\geq 0\,,\,x_{ij\phi\lambda}\geq 0\,,\,ss_{ij\phi\lambda}\geq 0 \qquad \forall \boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\lambda} / \boldsymbol{i}\in\boldsymbol{I},\boldsymbol{j}\in\boldsymbol{J},\boldsymbol{\phi}\in\boldsymbol{Q}_i,\boldsymbol{\lambda}\in\boldsymbol{R}_i \tag{19}$$

$$x_{ij\phi\lambda},y_{ijk},ss_{ij\phi\lambda}\in\mathbb{R},b_j\in\left\{0,1\right\},e_{i\phi}\in\left\{0,1\right\} \tag{20}$$

La función objetivo (1) se caracteriza por buscar una secuencia de envíos de materia prima al menor coste en términos de transporte suministrador-fabricante ($CT_{ij\phi\lambda}$), mantenimiento de inventarios de estos productos por parte de este último ($CW_{ij\phi\lambda}$) y transformación de la materia prima de los componentes ($CS_{ij\phi\lambda}$). Así mismo, con el parámetro $CW_{ij\phi\lambda}$ también se tiene en cuenta la reducción al máximo del coste de oportunidad sobre el valor de polvo de UO_2 que el fabricante mantiene almacenado a la espera de su consumo.

La cantidad de UO_2 a transportar hacia el fabricante viene limitada por la capacidad física de los medios logísticos (β), bien sea por razones de volumen/peso o por motivos económicos. Para ello se formula la restricción (2). Del mismo modo, se establece una cantidad de material mínima por envío (α). Con la inecuación (3) fijamos el límite inferior de la carga puesta en juego dicha semana.

Generalmente, en un horizonte a corto o medio plazo las capacidades de fabricación son limitadas. Mediante las restricciones (4) y (5) conseguimos establecer la tasa máxima de conversión (γ) de UF_6 en UO_2 de la planta del suministrador. Así mismo, la inecuación (6) asegura que no se supere esta última no sólo a nivel de enriquecimiento sino también de planta durante la semana j-ésima.

Las restricciones (7) y (8) se definen para evitar situaciones incongruentes como transformaciones de UF_6 cuando no ha llegado todavía al suministrador o, bajo el mismo criterio pero desde el punto de vista del fabricante, que la recepción de UO_2 llegue después de la fecha de consumo.

El transporte del UO_2 no transformados inicialmente ($y_{ij\phi\lambda}$) queda limitado a la cantidad ya procesada en el suministrador menos los que ya han sido enviados previamente. La inecuación (9) cumple la anterior hipótesis. Al mismo tiempo, para cada uno de los transportes de un mismo enriquecimiento i debemos permitir que sea posible cubrir las necesidades a partir de diferentes recepciones ϕ de UF_6. Condicionante que se consigue limitar con la restricción (10).

Si nos centramos ahora en el fabricante, el establecimiento de un stock de seguridad o estratégico en sus instalaciones (SFS_i) conllevará la necesidad de alcanzarlo en el menor plazo posible, es decir, preferentemente en el primer envío que se haga de dicho producto i si es posible. La inecuación (11) obliga a satisfacer dicho requerimiento, teniendo en cuenta además el inventario inicial en la propia fábrica (FS_{0i}) del mismo enriquecimiento. Sin embargo, para los siguientes envíos de los posteriores consumos λ ya no sería necesario contemplar el stock de seguridad si ya está cubierto en el primer envío, por lo que se fija la restricción (12).

Para tener en cuenta el stock inicial en la fábrica (FS_{0I}) una sola vez utilizamos la inecuación (13) como balance de conservación del material enviado y consumido.

Siguiendo con los balances materiales, la restricción (14) establece que no se transforme más UF_6 del que se haya recibido para cada una de las recepciones ϕ de cada enriquecimiento i.

En el periodo temporal que transcurre desde el inicio hasta el momento en el que el suministrador dispone de UO_2, únicamente se podrán realizar envíos cuya cantidad sea como máximo la correspondiente al inventario inicial en sus instalaciones, inecuaciones (15) y (16).

Así mismo, la suma de aquellos envíos que se produzcan del UO_2 que inicialmente estaba procesado ($ss_{ij\phi\lambda}$) no debe superar al valor fijado como dato (SS_{0i}). La restricción (17) consigue limitarlo.

A veces puede suponerse un periodo de retención hasta la expedición del producto por parte del suministrador. Por esta razón se fija la condición (18).

Finalmente las restricciones (19) representan la no negatividad de las variables de decisión $ss_{ij\phi\lambda}$, $x_{ij\phi\lambda}$ e $y_{ij\phi\lambda}$; mientras que los conjuntos (20) definen el carácter real de las anteriores así como binario y entero para b_j y $e_{i\phi}$.

3. RESULTADOS

Con el objetivo de ejemplificar el modelo presentado vamos a simular una planificación de una secuencia de aprovisionamiento de UO_2. Para un periodo de aproximadamente once meses (m = 41 semanas) tendremos en cuenta cuatro enriquecimientos (n = 4): 1.60% (i = 1), 2.00% (i = 2), 3.95% (i = 3) y 4.95% (i = 4).

Por un lado, dispondremos de un material en forma de UF_6 en el reconvertidor que debe ser transformado a UO_2 para su empleo en la fabricación de los compuestos cerámicos de UO_2. La Tabla 1 recoge las existencias de UO_2 en las instalaciones del reconvertidor y la propia fábrica de combustibles nucleares así como el stock considerado como estratégico.

Tabla 1. Stock inicial del material en el reconvertidor, en la fábrica y estratégico en la misma

i	SS_{0i} (t U equiv.)	FS_{0i} (t U equiv.)	SFS_i (t U equiv.)
1	4	0	2
2	7	1	1
3	2	2	3
4	10	3	1

Sobre las llegadas de UF_6 y consumos de UO_2, la Tabla 2 contiene dicha información: una recepción de UF_6 al 1.60% ($q_1 = 1$), cuatro del 2.00% ($q_2 = 4$), una del 3.95% ($q_3 = 1$) y una del 4.95% ($q_4 = 1$).

Tabla 2. Programa de fechas de disposición de UF_6 y consumo de UO_2

Semana de llegada de UF_6			Semana de consumo de UO_2		
i	ϕ	$v_{i\phi}$	i	λ	$w_{i\lambda}$
1	**1**	1	**1**	**1**	11
2	**1**	6	**1**	**2**	14
2	**2**	10	**1**	**3**	18
2	**3**	14	**2**	**1**	27
2	**4**	18	**3**	**1**	33
3	**1**	16	**3**	**2**	41
4	**1**	16	**4**	**1**	37

Los periodos temporales establecidos son: $d_1 = 1$, $d_2 = 3$ y $d_3 = 1$. A su vez, también es necesario fijar las capacidades mínima y máxima de transporte por semana: $\alpha = 4$, $\beta = 20$ y $\gamma = 8$.

En la Tabla 3 se recogen las cantidades de UF_6 que llega al reconvertidor y los valores de UO_2 de los consumos que se producen en la fábrica: tres consumos de UO_2 al 1.60% ($r_1 = 3$), uno del 2.00% ($r_2 = 1$), dos del 3.95% ($r_3 = 2$) y uno del 4.95% ($r_4 = 1$).

Tabla 3. Identificación de necesidades de abastecimiento de UF_6 y UO_2

Suministro de materia prima en UF_6 (t equivalente de U)				Consumo de materia prima en UO_2 (t equivalente de U)			
i	j	ϕ	$a_{ij\phi}$	i	j	λ	$z_{ij\lambda}$
1	**1**	**1**	27	**1**	**11**	**1**	10
2	**6**	**1**	3	**1**	**14**	**2**	14
2	**10**	**2**	15	**1**	**18**	**3**	5
2	**14**	**3**	15	**2**	**27**	**1**	50
2	**18**	**4**	10	**3**	**33**	**1**	21
3	**16**	**1**	30	**3**	**41**	**2**	7
4	**16**	**1**	25	**4**	**37**	**1**	34

Por último, los valores de las constantes que definían los costes serían: $k_1 = 10^4$, $k_2 = 10^3$ y $k_3 = 10^2$.

Para resolver el problema planteado hemos utilizado la versión 8 del software *Mathematica*. La solución obtenida se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Programa de envíos de material de la solución del caso de análisis planteado

		ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE
	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	33	34	35	36	37	38	39	40	41
a1,j,1	x1,j,1,1	27			8																																	
y1,j,1,1/ss1,j,1,1	z1,j,1				8+4							10																										
x1,j,1,2						6	8																															
y1,j,1,2/ss1,j,1,2	z1,j,2							14							14																							
x1,j,1,3						2		3																														
y1,j,1,3/ss1,j,1,3	z1,j,3							5											5																			
a2,j,1	x2,j,1,1						3			3																												
y2,j,1,1/ss2,j,1,1	z2,j,1	1													3+6													50										

		ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE
	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	33	34	35	36	37	38	39	40	41
a2,j,2	x2,j,2,1										15			8	7																							
y2,j,2,1/ss2,j,2,1															11				4																			
a2,j,3	x2,j,3,1														15			8	7																			
y2,j,3,1/ss2,j,3,1																			14				1															
a2,j,4	x2,j,4,1																		10			2	8															
y2,j,4,1/ss2,j,4,1																							10															
a3,j,1	x3,j,1,1																30			5	8			7														
y3,j,1,1/ss3,j,1,1	z3,j,1																		2					20						21								
x3,j,1,2																				1		6																
y3,j,1,2/ss3,j,1,2	z3,j,2																						7															7
a4,j,1	x4,j,1,1																25			2				1	8	8	3											
y4,j,1,1/ss4,j,1,1	z4,j,1	3			6			1															2				20							34				
UF_6 CONVERTIDO TOTAL		0	0	0	8	8	8	3	0	3	0	0	0	8	7	0	0	8	7	8	8	8	8	8	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UO_2 ENVIADO TOTAL		4	0	0	18	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0	20	20	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4. CONCLUSIONES

En la actualidad, la competencia a nivel empresarial no se considera entre una u otra compañía sino, más bien, entre una u otra cadena de suministro, formadas a su vez por varias corporaciones (Yoo, Cho y Yücesan, 2010). Se induce, por tanto, que la eficiencia de la red logística viene determinada por la actuación del participante más débil. Por consiguiente, este sistema debe gestionarse desde un punto de vista integrador que permita afrontar los problemas con eficacia.

La solución propuesta se ha desarrollado mediante programación lineal entera mixta (MILP) para diseñar el programa de abastecimiento de materia prima para una industria particular, aunque puede ser de aplicación para otros sectores. Al tratarse de un problema de logística de aprovisionamiento, nos hemos centrado exclusivamente en tres actores: suministrador, operador logístico y fabricante.

La implantación del modelo presentado permite disponer de una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones de la etapa de aprovisionamiento de materia prima. Así mismo, tanto la simplicidad de la formulación como la versatilidad de aplicación hacen posible una ágil y exitosa implantación práctica, además de conseguir un grado de automatización considerable en ciertas etapas de la actividad logística que permite un trasvase de valor a fases más críticas.

5. BIBLIOGRAFÍA

Erengüç, S. S.; Simpson, N. C. y Vakharia, A. J. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research, 115*(2), 219-236.

Shapiro, J. (2007). *Modeling the supply chain*: Thomson Brooks/Cole.

Yoo, T.; Cho, H. y Yücesan, E. (2010). Hybrid algorithm for discrete event simulation based supply chain optimization. *Expert Systems with Applications, 37*(3), 2354-2361.