ANÁLISIS DE DIFERENTES METODOLOGÍAS DE ALOCACIÓN PARA UN ÁREA DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO

Joaquín Piechocki, Vicente Nadal Mora, Natalia Reale, Santiago Pezzotti, Juan Meschini

Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria, UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.
Email: giai@ing.unlp.edu.ar

MODELOS DE ASIGNACIÓN

Los modelos de asignación buscan como objetivo primario asignar un valor de producción contable a cada unidad productiva de un sistema de producción. La asignación resultante es la culminación de estrategias de utilización de la información de las mediciones del proceso que se estudia, tanto puntual en términos cronológicos, como histórica. Por esta razón, como objetivo complementario a la alocación, se busca reducir las incertidumbres en términos globales, de los valores alocados. Con este objetivo el modelo de asignación se vale de mediciones realizadas en el sistema, como por ejemplo, la dada por la medición de los caudales que ingresan y egresan de nodos de producción, que podrían representar instalaciones petroleras o fuentes de generación de vapor.

Por otro lado los modelos de alocación deben asignar las diferencias medidas, que surgen de los balances en los distintos conjuntos de instalaciones que componen al sistema, que en el caso de un área de producción de petróleo pueden ser plantas de tratamiento, plantas de corte, baterías y pozos.

A los fines prácticos se propone un sistema genérico de alocación, compuesto por una unidad que llevará el índice 1 que concentra la producción de las unidades 2, 3 y 4. A su vez, la unidad 2 recibirá la producción de 5, 6 y 7. En el siguiente esquema se grafica el caso que se propone.

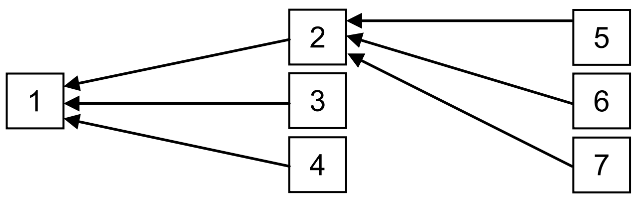

Figura 1 – Estructura de alocación

Como definición, el sistema de medición genera, entonces, un conjunto de mediciones dadas por una magnitud Q_i, y su incertidumbre de medición respectiva, uQ_i.

Modelo de Alocación Proporcional

El modelo de alocación proporcional, como su nombre lo indica, se basa en una distribución proporcional de la producción (PBA, Proportional Based Allocation) en función de la contribución de los caudales aportantes. Este hecho implica que la diferencia entre la medición fiscal y el caudal que surge de la suma de los caudales aportantes se distribuye proporcionalmente a ellos.

En la alocación proporcional, las incertidumbres derivadas del proceso o de las mediciones no participan en el reparto de la producción fiscal.

En este modelo de alocación no se consideran ni desviaciones sistemáticas del sistema, ni aleatorias. En el caso que las hubiere, se genera un desbalance en el sistema que únicamente puede eliminarse removiendo el causal del error. En el caso que un aportante de caudal de producción presente una lectura con desvíos sistemáticos, el error va a ser distribuido proporcionalmente a todos los aportantes, de una manera que no refleja las condiciones de probabilidad que se despliegan en el sistema de medición, y por tanto "inequitativa", dificultando a su vez su detección. Este escenario es proporcional a la complejidad del sistema y a la magnitud de los desvíos.

La aplicación práctica de esta estrategia implica determinar un factor de alocación a nivel de cada nodo, dado por la razón entre la producción que egresa del nodo y la suma de las producciones ingresantes. De esta manera, la producción alocada a cada ramal ingresantes viene dada por:

$Q_{1\,A} = Q_1$
$Q_{2\,A} = Q_1\ (Q_1+Q_2+Q_3)^{-1}\ Q_2$
$Q_{3\,A} = Q_1\ (Q_1+Q_2+Q_3)^{-1}\ Q_3$
$Q_{4\,A} = Q_1\ (Q_1+Q_2+Q_3)^{-1}\ Q_4$
$Q_{5\,A} = Q_{2\,A}\ (Q_5+Q_6+Q_7)^{-1}\ Q_5$
$Q_{6\,A} = Q_{2\,A}\ (Q_5+Q_6+Q_7)^{-1}\ Q_6$
$Q_{7\,A} = Q_{2\,A}\ (Q_5+Q_6+Q_7)^{-1}\ Q_7$

Es posible determinar la incertidumbre en la alocación proporcional, que resulta un indicador de la calidad del proceso de asignación en general. Para cada nodo en particular, para cada medición, la mejora de calidad que supone adoptar el valor alocado, está dada por esta diferencia en la incertidumbre entre la alocación y el valor medido.

La incertidumbre en el caudal alocado para cada punto de medición se calcula a partir de:

$$uQ_{k\,A} = \left(\sum (\mathrm{d}Q_{k\,A}/\mathrm{d}Q_i\ uQ_i)^2\ \right)^{1/2}$$

donde, $uQ_{k\,A}$ es la incertidumbre de la alocación del punto k, y uQ_i es la incertidumbre de la medición del punto *i.*

Las incertidumbres de las cantidades alocadas deberán ser calculadas secuencialmente, y por lo tanto las magnitudes de incertidumbre se propagan a través de las etapas de alocación, que en el caso de la Figura 1 son 2: aquella compuesta por los puntos 2, 3 y 4, y la que comprende los puntos 5, 6 y 7.

Alocación basada en la reconciliación de datos (DVR)

El método de alocación basado en la reconciliación de datos se basa en minimizar la función penalidad, e, que se propone como un indicador de calidad general del sistema de alocación:

$$e = \sum \left((Q_{i\,A} - Q_i) / uQ_{i\,A}\right)^2$$

A estos fines se busca un conjunto de datos asignados a cada punto de medición, tales que optimicen su calidad medida dada por e. O lo que es equivalente, que este conjunto de datos minimice la función e.
El conjunto de mediciones Q_i deberá cumplir con las restricciones que impone el sistema, como igualdades o desigualdades. En el caso de que se trate de un sistema donde se va adicionando caudal en un sistema como el que se esquematiza, estas ecuaciones estarán dadas por:

$0 = Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_1$
$0 = Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_2$

En general las mediciones Q_i no cumplen con estas condiciones, sino que arrojan valores distintos a la igualdad impuesta. Por el contrario, de manera simultánea las variables $Q_{i\,A}$ deben cumplir con las funciones que definen los condicionamientos del problema de optimización. Sobre la base de la resolución de la minimización de la función penalidad, se halla de manera simultánea una solución de las ecuaciones de balance. Este hecho es una de las principales fortalezas del presente método considerando que busca simultáneamente una solución para la alocación en todos los niveles, evitando los efectos de propagación que cuentan los sistemas que se aplican de forma secuencial para cada nivel.
Este método, por definición, permite hallar valores alocados con mínima incertidumbre global de alocación, que cumple con las restricciones del sistema.
El modo de ejecución de la búsqueda de datos puede abordarse según dos grandes métodos. Por un lado es posible hallar el mínimo del sistema por medio de operaciones algebraicas matriciales generales cuando se trata de problemas lineales (como es en general el caso presentado). Cuando las ecuaciones de balance presentan no linealidades, entonces es necesario acudir a métodos numéricos de minimización.
Para el sistema propuesto se consolida un conjunto de datos provenientes de las mediciones del sistema que consolidará un vector **Q,** formado por *n* mediciones, y una matriz $\mathbf{S_Q}$ de covarianza, formado por la determinación empírica de las incertidumbres de medición asociadas. La matriz de covarianza, $\mathbf{S_Q}$, tiene por elementos a uQ_{ij}, donde *i* y *j* van de 1 a *n* mediciones. Los elementos de la diagonal mayor de la matriz uQ_{ii}, son los valores de uQ_i^2. Se considera como hipótesis que las mediciones Q_i son independientes entre sí y por tanto los restantes elementos de la matriz se consideran 0. El resto de los componentes dependen del producto de las incertidumbres de las mediciones implicadas, Q_i y Q_j, multiplicadas por un coeficiente de correlación que es necesario determinar a partir del estudio específico del historial entre esas dos mediciones.
A los fines de componer la estructura del sistema se formará una matriz **F** de coeficientes constantes donde se configura el balance del sistema. En cada fila se representará el aporte de cada medición Q_i a un estado cuyo resultado es igual a cero. Vale decir que las cantidades alocadas deberán cumplir con la condición: $\mathbf{F\,Q_A} = 0$. Por otro lado el resultado de **F Q**, típicamente mayor a cero, dará cuenta del desequilibrio del sistema.
El vector de alocación estará dado por:

$$\mathbf{Q_A = Q - S_Q\,F^T\,(F\,S_Q\,F^T)^{-1}\,F\,Q}$$

Para cada cantidad Q_i, se determinará una cantidad alocada, Q_{iA}, tales que definen un vector, **v**, cuyos elementos están dados por $v_i = Q_i - Q_{iA}$.
El vector de varianza de la corrección, $\mathbf{S_v}$, estará dado por:

$$\mathbf{S_v = S_Q\,F^T\,(F\,S_Q\,F^T)^{-1}\,F\,S_Q}$$

El vector de varianza de alocación, $\mathbf{S_{QA}}$, estará dado por:

$$\mathbf{S_{QA} = S_Q - S_Q\,F^T\,(F\,S_Q\,F^T)^{-1}\,F\,S_Q}$$

La diagonal mayor del vector de varianza de alocación estará formado por uQ_{Ai}^2.
La función *e* impondrá la siguiente condición para verificar que la alocación se encuentra, en términos globales, en condiciones aceptables de calidad:

$$e = \mathbf{F\,x}\,(\mathbf{F\,S_x\,F}^T)^{-1}\,\mathbf{F\,x} \leq \chi^2_{r,95\%}$$

El valor de $\chi^2_{r,95\%}$ depende de los grados de libertad *r,* que en la presente aplicación es asimilable al número de filas de la matriz **F**. A continuación se presenta la tabla correspondiente al cuantil de 95% de χ^2_r para grados de libertad de 2 a 10.

Tabla 1 – Tabla de límites para la evaluación de R_A en función de los grados de libertad del sistema

Grados de libertad, *r*	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\chi^2_{95\%}$	5,99	7,81	9,49	11,07	12,59	14,07	15,51	16,92	18,31

La condición de calidad para cada Q_{iA} está dada por:

$r_i = (v_i^{\,2} / (S_{vii}))^{1/2} < 1,96$
Los desvíos sistemáticos puntuales pueden ser detectados y localizados a partir de r_i.

Estos residuos indicadores conformarán una matriz de residuos **R**.

La dependencia estocástica entre distintas cantidades alocadas resulta útil para rastrear el origen de los potenciales problemas en el sistema, que fueron indicados por r_i. Por ejemplo, si para el indicador anterior, la medida Q_{iA} no cumpliera con la condición de calidad, sería útil identificar las otras mediciones con las cuales aparecen las mayores contradicciones que r_i marca. Con este fin se define la matriz $\mathbf{C_v}$, que indica la correlación estadística de la alocación *i* con otra *k*, cuyos elementos estarán dados por:

$\mathbf{C}_{v\,ik} = \mathrm{ABS}(S_{v\,ik} / (S_{v\,ii}\, S_{v\,kk})^{1/2})$

En este mismo sentido puede ser de utilidad establecer cuáles de las ecuaciones de balance resultan más relevantes para determinada indicación de degradación de la calidad de la alocación. Para esto se define una matriz $\mathbf{C_{vF}}$, cuyo desarrollo se puede encontrar en VDI 2048 Part 1, cuyos elementos permiten ordenar las ecuaciones, que están dados por:

$\mathbf{C}_{vF\,ij} = S_{V,\Delta Fj} / (S_{Vi}\, S_{V\,\Delta j})^{1/2} = (e_j\, S_V\, F_j)/ (S_{v\,ii}\, (F_j\, S_V\, F_j^{T}))^{1/2}$

donde, $\mathbf{e}_j$ es un vector unitario que estará compuesto de 0 para todas las posiciones de medición, menos en la posición *i*, donde será 1. Esta matriz de coeficientes permite tener una medida relativa del efecto de la medición *i* sobre la ecuación de balance *j*.

La alocación DVR mantiene la integridad frente a la aparición de desvíos, porque limita su propagación al sistema. Este hecho permite identificar aquellos puntos de medición que arrojan mayores residuos como los susceptibles de mejora, como los prioritarios en la búsqueda general para el proceso. Esto quiere decir que el control en el tiempo de los residuos permite jerarquizar las oportunidades de mejora en el sistema.
El método DVR tiene, en su formulación, la posibilidad de:

- utilizar la información redundante disponible para disminuir la incertidumbre general de la alocación,
- estimar valores no medidos,
- detectar y localizar desviaciones sistemáticas,
- detectar desviaciones generales de la alocación,
- establecer vínculos entre mediciones y subsistemas componentes de la estructura medida.

Análisis de caso

El caso que se presenta a continuación muestra un primer conjunto de mediciones de un sistema productivo de petróleo, yacimiento, con la estructura presentada en el esquema de la Figura 1. El primer conjunto de mediciones es consistente con desviaciones aleatorias que se producen en el espacio muestral propio en el cual se incluyen, vale decir que muestran desviaciones por causas normales. Para este conjunto de datos se aplican las dos estrategias de alocación propuestas. Se computa como Δu_{Ai} la diferencia entre la incertidumbre de alocación PBA y la DVR.

i	**Medición**		**Alocación PBA**		**Alocación DVR**			$\Delta u_{A\,i}$
	Q_i	uQ_i	$Q_{A\,i}$	$uQ_{A\,i}$	$Q_{A\,i}$	$uQ_{A\,i}$	r_i	
1	3152	1,8	3152	1,8	3152,1	1,78	0,091	1,22%
2	2840	37,4	2857	10,5	2822,9	10,32	0,475	0,45%
3	263	10,5	265	10,2	261,2	10,03	0,539	1,42%
4	30	2,0	30	2,0	29,9	1,99	0,103	1,54%
5	1200	50,0	1211	42,5	1189,9	39,38	0,327	6,22%
6	1580	63,0	1594	44,7	1564,0	39,71	0,327	7,99%
7	51	3,0	51,5	3,4	50,9	2,99	0,038	12,12%

En el caso anterior se muestra que la alocación DVR a partir de su indicador r_i no acusa desviaciones por causas anormales. También es posible concluir que el método DVR asocia la información disponible de las mediciones de una manera que genera una alocación de mayor calidad al respecto de PBA, dada por la mejora indicada por Δu_{Ai}. Se observa adicionalmente que estas mejoras se acentúan en la medida que aumenta el número de etapa de alocación.
El caso que sigue incluye una desviación en la medición 2 en donde se introduce un faltante de 60 unidades.

i	**Medición**		**Alocación PBA**		**Alocación DVR**				$\Delta u_{A\,i}$
	Q_i	uQ_i	$Q_{A\,i}$	$uQ_{A\,i}$	$Q_{A\,i}$	$uQ_{A\,i}$	r_i	$C_{v\,i2}$	
1	3152	1,8	3152	1,8	3152,1	1,8	0,311	0,89	1,22%
2	2780	37,4	2849,7	10,7	2707,5	10,3	2,017	-	1,00%
3	263	10,5	269,6	10,4	256,92	10,0	1,832	0,89	3,34%

4	30	2,0	30,8	2,7	29,78	2,0	0,349	0,89	3,57%
5	1200	50,0	1207,9	41,7	1191,69	39,4	0,27	0,03	4,68%
6	1580	63,0	1590,4	44,0	1566,81	39,7	0,27	0,03	6,81%
7	51	3,0	51,3	3,3	50,97	3,0	0,032	0,03	9,85%

Se puede observar que la alocación PBA muestra alguna diferencia menor en magnitudes alocadas al respecto del caso anterior, sin permitir la identificación del desvío presente. La alocación DVR produce una mejor alocación en estas condiciones. Al mismo tiempo la alocación DVR indica la existencia de un desvío producido por causas anormales en la medición 2, como se encuentra señalado en la tabla. El parámetro de correlación $C_{v\ i2}$ permite identificar el nivel de impacto de este desvío en el resto de las mediciones, destacándose las de los puntos 1, 3 y 4.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Es posible concluir que la alocación DVR permite realizar mejores alocaciones bajo condiciones normales de funcionamiento de un determinado proceso y de un determinado sistema de medición. Por otro lado permite identificar desvíos por causas anormales. Para agregar, la detección de desvíos por causas anormales permite tener un control no sólo de la alocación sino de las mediciones que componen el sistema de información. Este conjunto de herramientas adicionales posibilita además no sólo evaluar modificaciones en la estructura de alocación sino también diseñar estructuras que maximicen la asociación de la información de mediciones que se pueda disponer. Este conjunto de posibilidades representa una fuente de muy bajo costo de mejora en los procesos productivos, de reducción de los costos de los sistemas de medición, de mejora en los procesos de planificación, y de información para la toma de decisiones frente a incidencias productivas.
Por todo lo analizado se entiende recomendable la implementación de la alocación DVR por sobre la alocación PBA, para yacimientos de petróleo, siendo que en general esta última es la habitualmente utilizada.