



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Comparación de rutas de reacción para seleccionar la más segura con el método ELECTRE

Enrique Arce Medina e Irma P. Flores Allier.

Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del IPN. Edif. 7, Unid Prof. ALM, Col.

Lindavista, Mex. D.F., C.P. 07738.

E-mail: earcem@yahoo.com.mx

Resumen

Los problemas de toma de decisiones involucran varias alternativas de las cuales hay que decidir a favor de una. Durante el diseño básico de los procesos químicos la etapa más importante es la elección de la ruta de reacciones, ya que de ello depende el uso que se tendrá de los recursos materiales y energéticos, así como del rendimiento económico y el posible impacto ambiental. En este artículo se presenta el método ELECTRE que usa el concepto de sobre-calificación y límites de comparación como ayuda en la selección de alternativas caracterizadas por múltiples criterios. El método permite evaluar las ventajas y desventajas relativas entre las alternativas en cada criterio y jerarquizarlas en un orden de preferencias, de la mejor a la peor. Se presenta una modificación al método original que lo simplifica y un ejemplo que ilustra los pasos del método.

Palabras clave: Diseño, Electre, Ruta de reacciones

Abstract

Decision-making problems involves several alternatives which a decision must be made in favor of one. During basic desing of chemical processes, the most important stage is choosing the path of reactions, since of this depends the use of the material and energy resources, economic performance and the potential environemental impact. In this paper, is presented the ELECTRE

method that uses the concept of over-qualification and limits compared to aid in the selection of characterized alternatives by multiple criteria. The method allows to evaluate the relative advantages and disadvantages of the alternatives in each criterion and rank the alternatives in order of preference, from best to worst. It is presented a modification to the original method that makes it simpler and an example illustrating the method steps.

Keywords: Design, Electre, Road reactions

©2013 RIIIT, Todos los Derechos Reservados

Introducción

Puesto que hay diferentes formas de obtener el mismo producto se deben evaluar las diferentes rutas de reacción. Se prefieren reacciones que usen las materias primas más baratas y generen el menor número de subproductos no deseados, pero otros factores también deben considerarse; por ejemplo que sean más seguras, es decir, que ocurran bajo condiciones de temperatura y presión poco severas, que no impacten adversamente al medio ambiente, si es que llegan a ocurrir accidentes [1]. La selección de rutas de reacciones que sean inherentemente seguras es un procedimiento complejo de toma de decisiones, este artículo presenta la comparación de rutas de reacción para seleccionar la más segura con el método ELECTRE.

Los ejecutivos de las grandes empresas así como los dueños de las pequeñas saben que no hacer el uso adecuado de la información puede causar una mala decisión y en consecuencia una reducción de ganancias en el mejor de los casos, y en el peor pérdidas económicas. Los problemas de toma de decisiones involucran varias alternativas y de las cuales hay que decidir a favor de una. Para comparar las alternativas se ha de contar con medios de valorarlas, es decir, calificarlas, para ello se requiere primero definir los atributos comunes a las alternativas y sobre los cuales se califican, estos también se llaman criterios. Existen varios métodos de jerarquización y selección de alternativas bajo multicriterio, desde el más simple que es la suma de calificaciones ponderadas hasta los más complicados como los métodos ELECTRE [2, 3, 4], PROMETHE [5, 6], y otros [7]. Estos métodos son conocidos como métodos de ayuda en la toma de decisiones con múltiples criterios o MCDA por sus siglas en inglés, (Multi-Criteria Decision Aid).

Los métodos de análisis multicriterio tienen muchas aplicaciones, por ejemplo en:

- a) Elección de la mejor ruta de reacciones
- b) Discriminación de candidatos
- c) Selección de proyectos de inversión
- d) Selección de propuestas de acción, etc.

La gama de aplicación del método ELECTRE es muy amplia [8, 9, 10, 11] y constantemente se encuentran nuevas aplicaciones como la que se presenta en este artículo. En general se usan como una ayuda en la toma de decisiones. De acuerdo con Baker [1] el proceso de toma de decisiones inicia con el planteamiento del problema que se puede dividir en cinco etapas: a) la definición del problema, b) la determinación de requerimientos, c) el establecimiento de metas, d) la identificación de las alternativas y d) la definición de los criterios. Las tres primeras etapas dependen del escenario en que se aplica el análisis, así como del número de participantes en la toma de decisión y del objetivo que se busque.

La cuarta etapa es crucial ya que deben identificarse las n alternativas (acciones, candidatos, objetos, proyectos, etc.), entre las cuales se debe escoger una, presumiblemente la mejor.

En la quinta etapa se definen los m criterios que son atributos de las alternativas que de alguna manera miden su desempeño. En muchas situaciones estos criterios son objetivos a maximizar o minimizar, además, algunos serán vitales y otros triviales por lo que es imperativo ordenarlas por su importancia. Para ello a cada criterio se les asigna una ponderación o peso de importancia w , que represente su relativa importancia de acuerdo a las preferencias de quienes califican las alternativas. El paso

siguiente en el proceso de toma de decisiones es calificar las alternativas en los criterios.

Una vez que se tiene esta información ya es posible pasar al análisis y manipular la información para seleccionar la mejor alternativa usando un método MCDA. Una notación estándar para las alternativas es A_1, A_2, \dots, A_n , para los criterios es C_1, C_2, \dots, C_m , para los pesos es w_1, w_2, \dots, w_m y para las calificaciones se usa $a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{n,m}$.

El método más simple es el de sumas ponderadas. Para ilustrar este método se propone el Ejemplo 1.

Ejemplo 1.

Se desea elegir a un candidato, entre varios, para un empleo. Considérese como atributos importantes para evaluar a los candidatos los criterios de la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios del ejemplo 1.

Criterio 1	La experiencia
Criterio 2	La escolaridad
Criterio 3	Dominio del inglés
Criterio 4	Conocimientos de informática

Para calificar a los candidatos en estos criterios hay que definir una escala de valoración, por ejemplo, para el criterio de experiencia se pueden tener las siguientes posibles calificaciones: *ninguna, poca, regular y bastante*. Mientras que para el criterio de escolaridad se pueden tener las posibles calificaciones siguientes: *mínima, menor a la media, sobrepasa a la media y elevada*. Si ha de calificarse a los candidatos en estos criterios, primero hay que normalizar las calificaciones. Para ello se define una escala de calificaciones, por ejemplo de 0 a 10, siendo 10 la mejor

calificación y 0 la peor, se presupone que hay que maximizar los criterios. Se propone la conversión de las calificaciones de los criterios a valores numéricos de acuerdo a unos intervalos convenientemente seleccionados, ver Tabla 2.

Tabla 2. Intervalos de correspondencia de calificaciones.

<i>lingüística</i>	<i>numérica</i>
Ninguna	0 – 2.5
Poca	2.5 – 5.0
Regular	5.0 – 7.5
Bastante	7.5 – 10.0

Cuando las calificaciones son numéricas y dentro de escalas muy diversas, es recomendable transformar las calificaciones a una escala única para su comparación. La transformación lineal es la más simple, de acuerdo a la ecuación 1.

$$\bar{a}_{i,j} = \frac{a_{a,j} - a^{\min}}{a^{\max} - a^{\min}} \tag{1}$$

En donde a^{\min} y a^{\max} son la peor y mejor calificación respectivamente. Con esta normalización la escala va de 0 a 1 y es adecuada para criterios que representen una ventaja o beneficios, para criterios que representen una desventaja o costos el numerador debe cambiar a $a^{\max} - a_{i,j}$.

Habiendo definido el ámbito de expresión para plantear el problema de toma de decisión, lo que sigue es la valoración de los candidatos. Se requieren evaluadores que han de ser expertos en la calificación de los

critérios, también llamados jueces o actores en la toma de decisión.

Del proceso de valoración los resultados se resumen en una tabla de calificaciones como la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de calificaciones.

<i>Candidato</i> <i>s</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
A1	3	8*	7	6
A2	5	5	9*	5
A3	7*	5	7	9*
A4	3	6	4	5
Pesos, w	0.2	0.1	0.3	0.4

En esta tabla los candidatos se identifican como *A1*, *A2*, etc. Mientras que los criterios se distinguen en las columnas como *C1*, *C2*, etc. La última fila contiene los valores de los pesos. A cada criterio se le asigna un valor numérico o peso, w_i , que va de mayor a menor en el sentido en que disminuye su importancia relativa con los otros criterios. Cuando $w_h > w_k$ implica que el criterio *h* es más importante que el criterio *k* y la expresión $w_h = w_k$ indica que ambos criterios son igualmente importantes. Cuando en un criterio se tiene la misma o casi la misma calificación para todas las alternativas se puede eliminar ese criterio, pues no brinda información relevante para la toma de decisiones.

En el ejemplo 1 se observa, por los valores de los pesos, que los evaluadores dan mayor relevancia a los conocimientos de informática e idiomas que a la experiencia y la escolaridad. En este ejemplo se eligen

valores de los pesos normalizados para que se cumpla que $\sum w_j = 1$.

Se marca con un asterisco las calificaciones mayores en los diferentes criterios y se puede ver que no hay ninguna alternativa que obtenga altas calificaciones en todos los criterios, es decir, que a simple vista no se distingue a un candidato que sea mejor que los demás.

Con el método de sumas ponderadas se calculan las sumas de productos de las calificaciones de las alternativas en los diferentes criterios multiplicadas por los pesos de ponderación de los criterios. Cálculo que se resume en la siguiente ecuación:

$$M_i = \sum_{j=1}^m a_{i,j} * w_j \quad (2)$$

Donde M_i = Calificación ponderada de la alternativa *i*.

$a_{i,j}$ = calificación de la alternativa *i* en el criterio *j*.

w_j = Peso de ponderación del criterio *j*.

Se ordenan las calificaciones ponderadas de mayor a menor y se selecciona la primera como la de mayor preferencia, la que le sigue tendrá la segunda preferencia, etc. Con este método se supone que hay que maximizar todos los criterios.

Se aplica la fórmula de la ecuación 2 a los datos de la Tabla 3 y se obtiene:

Candidato	Calificación
A3	7.6
A2	6.2
A1	5.9
A4	4.4

De acuerdo a las calificaciones se obtiene que el orden de preferencia de los candidatos es: $A3 > A2 > A1 > A4$, lo que indica que se elige al candidato A3 en primer lugar y A4 en último.

Habrán casos en que alguna alternativa aunque califique mayormente con respecto a las otras, en la mayoría de los criterios, al tomar una decisión con el método de sumas ponderadas se puede correr el riesgo de una mala decisión. Para aliviar este problema se han creado otros métodos como el ELECTRE que reduce el riesgo de tomar una mala decisión.

Método ELECTRE

Este método fue creado por B. Roy en 1969 [2] y desde entonces se ha modificado varias veces [3], la palabra ELECTRE se forma como acrónimo de la frase en francés, *ELimination Et Choix TRaduisant la realitE*. El método se aplica a través de tablas o matrices que se construyen a partir de la tabla de calificaciones. Dos conceptos importantes del método son la preferencia por sobre-calificación y ciertos umbrales de indiferencia y preferencia [6, 7].

En la tabla de calificaciones se observa que el candidato A3 en los criterios C1 y C4 obtiene mayor calificación que los otros candidatos. Se dice que el candidato que obtiene una calificación mayor o igual que los otros, sobre-califica en las evaluaciones. Simbólicamente esta “relación de superación” se expresa como:

$$A_h S_j A_k \tag{3}$$

La sobre-calificación indica que la alternativa A_h es preferible a la A_k , en el criterio considerado si la calificación de A_h es mayor o igual que la de A_k . En otras palabras se considera que A_h es tan buena o mejor que A_k .

El método ELECTRE establece dos condiciones para probar que A_h es preferible o sobre-califica a la A_k usando la relación de superación y dos tablas o matrices (matrices de concordancia y discordancia) que aplican de manera normalizada los valores de las calificaciones y los pesos.

El método procede en dos etapas [5], primero la construcción de relaciones de superación en las matrices de concordancia y discordancia y segundo la explotación de la información en las matrices construidas. El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

Etapas de construcción de las relaciones de superación.

1. Formar la matriz o tabla de concordancias. Indicar tanto en las hileras como en las columnas las alternativas y en cada celda el índice de concordancia $C_{h,k}$ calculado con la fórmula:

$$C_{h,k} = \frac{\sum_{j:A_h S_j A_k} w_j}{\sum_j w_j} \tag{4}$$

El índice de concordancia expresa una relación de preferencia al cuantificar la proporción de los pesos para los cuales la alternativa A_h es tan buena o mejor a la A_k . El término en el numerador de (4) indica que sólo se suman los pesos de los criterios en los que la alternativa A_h sobre-califica a la alternativa A_k , es decir, cuando $a_{h,j} \geq a_{k,j}$.

Esto implica que una alternativa aventaja y puede preferirse a otra si las calificaciones en la mayoría de los criterios son iguales o superan a la otra. El índice de concordancia varía entre cero (ausencia total de preferencia sea cual sea el criterio de valoración elegido) y uno (preferencia total de la alternativa sobre las demás).

La matriz de concordancias será:

$$C = \begin{bmatrix} - & C_{1,2} & \dots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & - & \dots & C_{2,n} \\ \vdots & \vdots & - & \vdots \\ C_{n,1} & C_{n,2} \dots & C_{n,(n-1)} & - \end{bmatrix}$$

Los elementos de la diagonal de la matriz se dejan en blanco ya que no se puede comparar a una alternativa con ella misma. La prueba de sobre-calificación se aplica a las alternativas de dos en dos.

2. Formar la matriz de discordancias de manera similar a la matriz de concordancias, calculando el valor en las celdas con la diferencia máxima positiva de las calificaciones, es decir:

$$D_{h,k} = \frac{\text{máxima positivo}(a_k - a_h) \Big|_{\text{en los } j \text{ criterios}}}{\text{calificación mayor} - \text{calificación menor}} \quad (5)$$

El índice de discordancia $D_{h,k}$ expresa la diferencia mayor positiva de las calificaciones para las que la alternativa A_h es peor que la A_k , por lo que sólo se toman en cuenta los pares en los que A_h no sobre-califica a la alternativa A_k . Si la calificación de A_h es mayor que la de A_k el índice de discordancia es cero. El denominador representa la amplitud de las calificaciones considerada en cada criterio.

El índice de discordancia captura la opción de inaceptabilidad de una alternativa como preferente, si presenta un bajo desempeño en las comparaciones de las calificaciones, aunque sea en al menos uno de los criterios y sobresalga en los demás, representa la existencia de una oposición significativa contra el índice de concordancia. En el cálculo del índice de discordancia no interviene la prueba de sobre-calificación ni los pesos.

Una simplificación al método que no altera los resultados, es no usar los términos en los denominadores de las ecuaciones 4 y 5, siempre que las calificaciones y los pesos se normalicen en la misma escala de valores. Las tablas o matrices de concordancia y discordancia son cuadradas, ya que contienen el mismo número de filas que de columnas.

3. Para identificar los patrones de dominancias se definen dos límites o umbrales de comparación, p y q . Estos valores pueden especificarse por los analistas en la toma de decisión, pero una forma práctica de obtener estos valores es con los índices de concordancia y discordancia.

Calcular el umbral de preferencia p con la matriz de concordancias como el valor próximo mayor o igual al promedio y que exista en los números de la matriz de

concordancias ($\bar{c} = \sum_i \sum_j C_{i,j} / n \cdot (n-1)$)

que indica la diferencia con la que una calificación aventaja a otra. De la misma manera el umbral de indiferencia q se determina con el valor próximo menor o igual al promedio y que exista en los números de la matriz de discordancias.

Etapas de explotación.

4. Se construyen dos tablas con las dominancias, primero una con las comparaciones por hilera de las alternativas, de dos en dos, en las matrices de concordancia y discordancia si se cumplen las condiciones siguientes:

La alternativa A_h domina a la alternativa A_k si $C_{h,k} \geq p$ y sólo si

$$D_{h,k} \leq q$$

A esta expresión se le conoce como la prueba de dominancia. Numéricamente distingue a la alternativa A_h como mejor a la A_k cuando su índice de concordancia está por arriba del umbral de sobre calificación y la discordancia esta por abajo del umbral de no sobre-calificación.

En la segunda tabla de dominancias se hacen las comparaciones por columna y deben cumplir la prueba de dominancia.

5. Al unir las dos tablas de dominancias se determina la lista de preferencias o jerarquía de las alternativas, ordenándolas según el mayor número de dominancias por hilera y el menor número de dominancias por columna. Así queda en primer lugar la que domina a las demás y ninguna la domina, ver Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de dominancias entre las alternativas.

	Dominancia por filas (F)	Dominancias por columnas (C)	Diferencia de dominancias F - C	Jerarquía
Alternativa A1				
Alternativa A2				
...				
Alternativa An				

En el método original [2,3] se forman dos matrices con los resultados de las pruebas de dominancias, primero la matriz de dominancia concordante, matriz F con

respecto a las concordancias con los valores en las celdas calculados como:

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{sí } C_{i,j} \geq p \\ 0 & \text{sí } C_{i,j} < p \end{cases}$$

Y segundo se forma la matriz de dominancia discordante G con respecto a las discordancias con los valores en las celdas calculados como:

$$g_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{sí } D_{i,j} < q \\ 0 & \text{sí } D_{i,j} \geq q \end{cases}$$

Después se calcula la matriz de dominancias agregadas con el producto $E = F \cdot G$, cuyos elementos corresponden al producto booleano $e_{i,j} = f_{i,j} \bullet g_{i,j}$. En esta matriz se tienen valores de 0 y/o 1. Significa que la alternativa de la fila considerada domina a las alternativas de las columnas en donde aparece un 1. Si aparece un cero, entonces la alternativa de la fila no domina a las de las columnas. Al determinar un orden de acuerdo al mayor número de dominancias para las alternativas se determina el orden de preferencia o jerarquía de las alternativas de la mejor a la peor. El procedimiento descrito simplifica los cálculos al evitar el producto booleano de las matrices F y G , del método original.

El método ELECTRE III y ELECTRE TRI introducen modificaciones para determinar los valores de índices de concordancia y discordancia, por lo demás se aplican igual [2].

Caso de estudio

El impacto negativo de las rutas de reacciones sobre el medio ambiente debe minimizarse, especialmente evitando o reduciendo el uso de sustancias que sean corrosivas, explosivas o tóxicas. Se han propuesto varios métodos para evaluar y comparar rutas de reacciones en términos de la seguridad inherente en los procesos químicos [12, 13, 14].

Se presenta como caso de estudio la selección de la ruta de reacciones inherentemente seguras para producir ácido acético. Se comparan seis rutas de reacción de las cuales se cuenta con información relacionada con las condiciones de reacción e impacto ambiental [13], definen los criterios siguientes, C1: temperatura, C2: Presión, C3: rendimiento, C4: índice de reacciones y C5: índice químico. Los datos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos para las rutas de reacción en la producción de ácido acético.

Alternativas de reacción	Temperatura T(°C)	Presión P(atm)	Rendimiento Y(%)	Índice de reacciones IR	Índice Químico IQ
A1:Oxidación de etileno	150	4.5	80	7	8
A2:Oxidación de butano	150 - 200	150 - 200	75	12	8
A3:Oxidación de acetaldehído	60 - 80	3 - 10	95	6	12
A4:Oxidación de etano	150 - 450	15 - 30	25	15	8
A5:Oxidación de etanol	60 - 115	1 - 4	90	6	8
A6:Oxidación de buteno	180 - 240	2 - 30	46	13	8

Estas variables son factores asociados a la peligrosidad de las rutas de reacción, a menor valor de T, P, IR o IQ se tendrá mayor seguridad. El IR caracteriza las condiciones de operación de las reacciones y la exotermicidad, mientras que el IQ caracteriza la corrosividad, explosividad y la toxicidad, información que se obtiene con los valores del diamante de riesgos de la NFPA. Se han asignado un rango de 0 a 10 para los factores T, P y rendimiento, Y en [12, 13] por ejemplo, se recomiendan índices con valores de 0 para Y=0% y 10 para Y=100%.

Discusión de Resultados

Con las seis rutas de reacción consideradas como alternativas (A1, A2, etc.) y los factores de las reacciones considerados como criterios de selección C1=T, C2=P, C3=Y, etc.), se forma la matriz de decisión normalizada que resume las calificaciones. Para la temperatura por ejemplo, primero se toman valores promedio en las temperaturas

en las que se reporta un intervalo de valores, por ejemplo para la alternativa A4, la temperatura del intervalo de 150 a 450 °C se toma un valor promedio de 300°C. Luego se

dividen todas entre el valor mayor, se restan de 1 y se multiplican por 10, quedando normalizadas en la escala de 0 a 10. La tabla de calificaciones queda:

	C1	C2	C3	C4	C5
Alt1	5	9.2	8	3.63	2
Alt2	4.17	0	7.5	1.82	4
Alt3	7.67	8.84	9.5	5.47	0
Alt4	0	5.98	2.5	0.19	4
Alt5	7.08	9.55	9	2.41	4
Alt6	3.0	7.14	4.6	5.60	4

Los elementos de esta matriz son las calificaciones $a_{i,j}$ para la alternativa A_i en el criterio j . El vector de pesos de ponderación de los criterios es $W = (3, 5, 2, 2, 4)$, el

criterio presión se considera como el más importante mientras que los criterios Y e IR son igualmente importantes. El vector normalizado de pesos resulta

$$\bar{W} = (0.1875, 0.3125, 0.125, 0.125, 0.250).$$

Las matrices de concordancia y discordancia que se obtienen son:

$$\begin{pmatrix} - & 0.75 & 0.5625 & 0.750 & 0.125 & 0.625 \\ 0.250 & - & 0.250 & 0.6875 & 0.250 & 0.5625 \\ 0.4375 & 0.750 & - & 0.750 & 0.4375 & 0.625 \\ 0.250 & 0.5625 & 0.250 & - & 0.250 & 0.250 \\ 0.875 & 1.000 & 0.5625 & 1.000 & - & 0.875 \\ 0.375 & 0.6875 & 0.375 & 1.000 & 0.375 & - \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} - & 2 & 2.67 & 2 & 2.08 & 2 \\ 9.2 & - & 8.84 & 5.98 & 9.55 & 7.14 \\ 2 & 4 & - & 4 & 4 & 4 \\ 5.5 & 5 & 7.67 & - & 7.08 & 5.41 \\ 1.22 & 0 & 3.06 & 0 & - & 3.19 \\ 3.4 & 2.9 & 4.9 & 0 & 4.4 & - \end{pmatrix}$$

Con valores de umbrales de $p=0.6$ y $q=4$, se obtiene la siguiente tabla de dominancias.

	Dominancia por filas (F)	Dominancias por columnas (C)	Diferencia de dominancias F - C	Jerarquía
Alternativa A1	A2, A4, A6	A5	2	3er. lugar
Alternativa A2	0	A1, A3, A5, A6	-4	5to. lugar
Alternativa A3	A2, A4, A6	0	3	4to. lugar
Alternativa A4	0	A1, A3, A5, A6	-4	5to. lugar
Alternativa A5	A1, A2, A4, A6	0	4	1er. lugar
Alternativa A6	A2, A4	A1, A3, A5	-1	2do. lugar

Aquí se interpreta que para la alternativa A1 domina a las alternativas A2, A4, A6 (dominancias por filas) y es dominada por la alternativa A5 (dominancias por columnas). De acuerdo a la columna de jerarquía el orden de preferencia es $A5 > A6 > A1 > A3 > (A2, A4)$, teniéndose un empate en la quinta posición entre las alternativas A2 y A4. Por lo que se obtiene que la oxidación de etanol es la ruta de reacción más inherentemente segura para producir el ácido acético. Este resultado es igual al que se obtiene en la literatura [13] usando un programa de computadora con un sistema experto.

Conclusiones

El caso de estudio de la comparación de rutas de reacción para obtener ácido acético ilustra la aplicabilidad del método ELECTRE para seleccionar entre varias la ruta inherentemente más segura. La idea de seleccionar la ruta de reacciones más seguras es diseñar el proceso químico que reduzca los riesgos asociados a las condiciones de operación, temperatura, presión, toxicidad y otros factores para preservar la seguridad del personal de las plantas químicas, las instalaciones y el medio ambiente. Los resultados son iguales a los reportados en la literatura con un método más sencillo que un sistema experto. La simplificación al método ELECTRE que se presenta en este artículo es una innovación al procedimiento de cálculo que lo hace más eficiente y simple.

Bibliografía

1. Edwards, D.W., Lawrence, D. Assessing The Inherent Safety of Chemical Process Routes: Is There a Relation Between Plant Costs and Inherent Safety?, *Trans IChemE*, **71** Part B 252-258. 1993.
2. Roy, B. – Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), *Revue Internationale de Recherche Opérationnelle*, no. 8, marzo-abril, 1968.
3. Roy B., Mousseau V., “A theoretical framework for analyzing the notion of relative importance of criteria”, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, vol. 5, 145–159, 1996.
4. Jaimes, L. J. L, F. J., Sandoval, y R. R. Torres, Aplicación del método Electra para la selección de un catalizador de hidrodeshidrogenación de tolueno. *Acta Mexicana de Ciencia y Tecnología*. Vol. X, Núm. 37. pp. 35-43. Enero-marzo, 1992.
5. Brans, J.P., Vincke, Ph. and Marechal, B. "How to select and how to rank projects: The PROMETHEE-method", *European Journal of Operational Research*, vol. 24, 228- 238, 1986.
6. Blondeau, P., M. Spérandio, F. Allard. Multicriteria analysis of ventilation in summer period, *Building and Environment*, Vol. 37, pp 165–176. 2002.
7. Figueira, J., S. Greco y M. Ehrgott. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer's International Series. 2005.
8. Leyva-López, J.C. y E. Fernández-González . A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology. *European Journal of Operational Research*. Vol. 148, pp. 14–27, 2003

9. Balasubramaniam A, A. R. Boyle y N. Voulvoulis. *Chemosphere*. Vol. 66. pp 791–798. 2007.
10. Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., Decision-making in energy planning. Application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renew. Energy*. Vol. 28, pp. 2063 – 2087. 2003.
11. Chatterjee P., V. M. Athawale y S. Chakraborty. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. *Materials and Design*. Vol.30. pp 4043–4053. 2009.
12. Heikkilä, A.-M. (1999), *Inherent Safety in Process Plant Design*, D.Tech. Thesis, VTT Publicat. 384, Technical Research Centre of Finland; <http://www.inf.vtt.fi/pdf/publications/1999/P384.pdf>
13. Palaniappan, C., Srinivasan, R., Tan, R. Selection of Inherently Safer Processes routes: a case study. *Chem. Eng. and Processing*. Vol. 43, pp. 647-653. 2004.
14. Gentile M. Development of a hierarchical Fuzzy Model for the evaluation of Inherent Safety. Tesis doctoral, Texas A. & M. University, Agosto 2004.