

Proyecto Fin de Carrera

Aplicación de una herramienta de ayuda a la
decisión multicriterio discreta en la elección de un
activo en el sector del metal. Métodos ELECTRE I y
IV.

Autor

Daniel Druet Solanas

Director

Antonio Muñoz Porcar

Centro Politécnico Superior

2013

Aplicación de una herramienta de ayuda a la decisión multicriterio discreta en la elección de un activo en el sector del metal. Métodos ELECTRE I y IV.

RESUMEN

El objetivo del proyecto que se presenta es la elección de la mejor inversión en activos para una empresa del sector del metal. La obsolescencia de los activos utilizados ha llevado a la empresa a la decisión de su renovación con el fin de mejorar su competitividad y mejorar los tiempos empleados en su proceso productivo.

Esta decisión, compleja debido a la inmovilización de recursos que supone, se ha tomado con el apoyo de metodologías de ayuda a la toma de decisiones. Los responsables decidieron apoyarse en una herramienta de ayuda a la decisión multicriterio denominada ELECTRE.

En el proceso se contemplan las siguientes fases y metodologías:

- 1.- Configuración técnica de la inversión. Metodología utilizada ELECTRE I.
- 2.- Selección del activo a adquirir. Metodología utilizada ELECTRE IV.
- 3.- Análisis de los resultados obtenidos y medida de la mejora en la competitividad de la empresa en función de la decisión tomada.

La ayuda en la toma de decisiones en las empresas se utiliza en multitud de situaciones. Decisiones tácticas o estratégicas requieren del rigor técnico y la ayuda científica para que sirvan de mejora en las oportunidades de negocio. La evolución positiva en los procesos productivos propiciados por una mejora en los activos utilizados redundará sin duda en una mejora en la posición competitiva de la empresa.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Cronograma.....	3
2. Herramientas de ayuda a la decisión.....	4
2.1. Del modelo monocriterio al modelo multicriterio.....	4
2.2. Modelos multicriterio.	5
3. Teoría y metodología ELECTRE I y IV.	6
3.1. Método ELECTRE I.....	6
3.2. Método ELECTRE IV.....	7
4. Aplicación práctica de la metodología ELECTRE.....	10
4.1. Aplicación del método ELECTRE I.....	11
4.1.1. Configuraciones técnicas.....	12
4.1.2. Evaluación de las alternativas respecto los atributos.....	13
4.1.3. Índices de concordancia y discordancia.....	13
4.1.4. Umbrales de concordancia y discordancia. Soluciones.	14
4.2. Aplicación del método ELECTRE IV.	15
4.2.1. Atributos de compra.	15
4.2.2. Alternativas de compra.....	15
4.2.3. Tablas de datos.	16
4.2.4. Implementación en el software.....	17
5. Análisis de las mejoras obtenidas.....	20
6. Conclusiones.	21
7. Bibliografía.	22
8. Anexos.	23

1. Introducción.

El objetivo de este proyecto es la aplicación de una herramienta de ayuda a la decisión multicriterio discreta en la elección de un activo para una empresa del sector del metal, que fabrica piezas metálicas para diversos sectores industriales.

Ante la situación actual y las necesidades del mercado se ve obligada a realizar una inversión para la renovación de un activo obsoleto. Con esta renovación se va a conseguir: mejorar su competitividad, sus tiempos de producción y la calidad del producto acabado, para adaptar su proceso productivo a las necesidades actuales del mercado.

Dicha inversión, compleja por las necesidades de recursos que supone, se ha tomado con el apoyo de *metodologías de ayuda a la toma de decisiones*, en concreto, la herramienta de decisión multicriterio denominada ELECTRE, en sus versiones I y IV.

Se ha elegido éste modelo de decisión multicriterio, en oposición de los modelos financieros, por la posibilidad de incluir decisiones técnicas y económicas para analizarlas conjuntamente y no basar la decisión en aspectos meramente financieros. Muchas empresas fundamentan su decisión únicamente en la rentabilidad financiera, pero en este caso se desea incluir los parámetros técnicos ya que el activo renovado es el más importante para la empresa.

El activo que la empresa ha decidido renovar se trata de una máquina de corte por plasma. Esta máquina es la base sobre la que descansa su proceso productivo. Supone aproximadamente el 25% del valor de los activos que posee y aporta más del 45% de la facturación de la empresa. Además es la que genera mayor valor añadido.

Existe gran variedad de configuraciones técnicas comerciales y características de dicha máquina, por lo que la toma de decisiones requiere de la ayuda de una metodología sistemática tipo ELECTRE que facilita este proceso de toma de decisiones según sus necesidades a medio y largo plazo.

Con la versión I de la metodología aplicada se estudiará la configuración técnica óptima del activo, atendiendo a los atributos necesarios para ello, todos dentro de las opciones que el mercado nos ofrece. Una vez se ha realizado éste estudio se logrará seleccionar un grupo de posibles configuraciones. Se ha elegido esta versión por la posibilidad de introducir pesos en los atributos de las configuraciones y así lograr un grupo de posibles candidatas para posteriormente analizarlas.

Una vez obtenido un subconjunto de alternativas técnicas y económicamente viables, se aplicará la versión IV a las resultantes. Con esta versión se obtendrá una ordenación de esas alternativas, de la mejor a la peor, y en base a esta ordenación se tomará la decisión. Se logrará así el activo más apropiado para la empresa. Se ha elegido este método por la dificultad de determinar los pesos de cada atributo ante la gran importancia de todos ellos.

Las alternativas y los atributos que se van a utilizar durante todo el proceso, aunque se analizan con profundidad en los siguientes apartados, se han definido mediante los siguientes puntos:

- Experiencia de la empresa en su sector industrial
- Reuniones con los distintos proveedores
- Visitas a diferentes fábricas y empresas con la tecnología análoga al activo estudiado

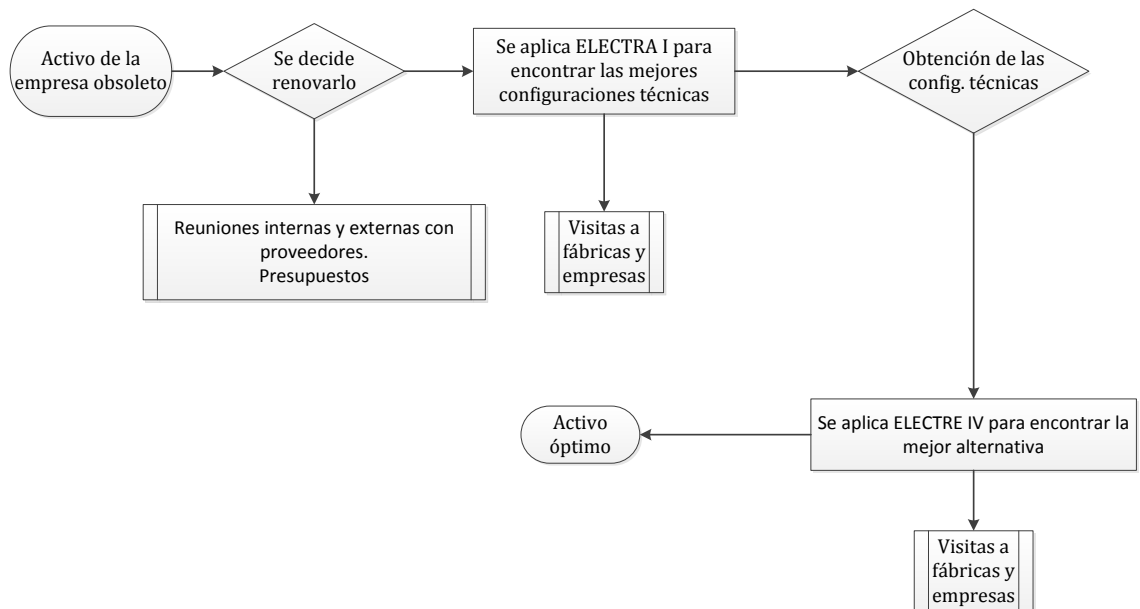
Se realizaron reuniones internas con el Departamento Técnico y con Gerencia para estudiar las posibilidades del mercado de máquinas de corte por plasma para efectuar una primera selección de alternativas existentes en el mercado, para tener una mayor capacidad de selección y poder de negociación. Éstas se mantuvieron durante todo el proceso con el fin de contrastar todos los enfoques posibles.

Mediante reuniones con los distintos proveedores consultados, se contrastó los puntos estudiados en las reuniones internas y comprobamos la posibilidad de nuestro estudio previo de alternativas, conociendo con esto la viabilidad de nuestro proyecto. Con éstas también se logra una vinculación y asesoramiento de las capacidades técnicas de los proveedores, que hace mejorar la decisión.

Las visitas a empresas y a fábricas de los proveedores tuvieron lugar desde octubre de 2011 hasta diciembre de 2011, por varios lugares de la geografía española y alemana. Gracias a estas visitas se puede valorar objetivamente las capacidades de nuestras alternativas, ofreciéndonos amplias versiones de las configuraciones seleccionadas mediante ELECTRA, mostrándose los puntos fuertes y débiles de nuestras alternativas estudiadas.

Se muestra un diagrama de flujo (*Gráfico 1*) mostrando las distintas fases del proyecto.

Gráfico 1: Diagrama de las fases del proyecto.

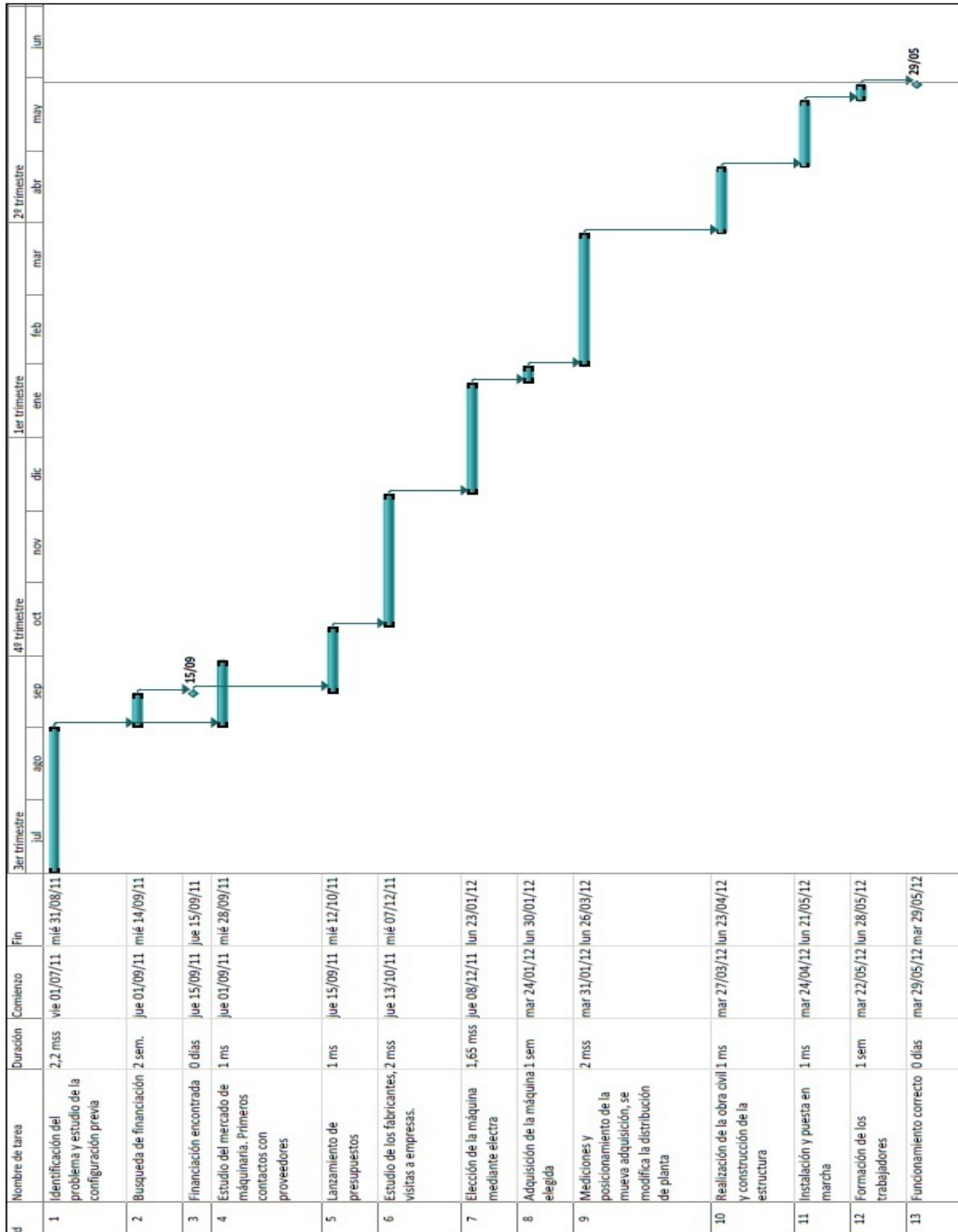


1.1. Cronograma.

Se muestra a continuación un diagrama de Gantt que resume la ejecución completa del proyecto (obsérvese *Gráfico 2*).

Se puede observar las diferentes etapas e hitos, estando este proyecto ubicado entre las etapas 1 y 7, utilizando las distintas etapas para nutrir de conocimientos los distintos parámetros, cuantificados más adelante, imprescindibles para la correcta ejecución de la adquisición y realizando un estudio objetivo del mismo.

Gráfico 2: Diagrama de Gantt. Elaboración propia



2. Herramientas de ayuda a la decisión.

2.1. Del modelo monocriterio al modelo multicriterio.

La Teoría de la Decisión ha sido estudiada extensamente en el ámbito de las ciencias de la Economía y la Ingeniería; los métodos más usados en la actualidad son producto de la investigación realizada en esas áreas de conocimiento.

La actividad desarrollada por las organizaciones, especialmente por las empresas, implica la gestión y la toma de decisiones. Para realizar la toma de decisiones necesitamos la existencia de varias alternativas que pueden ser elegidas por el decisor y la selección de una de estas alternativas.

El planteamiento tradicional del problema de decisión supone que las preferencias del decisor se pueden representar matemáticamente mediante una única función, la función objetivo, que permitirá ordenar las decisiones posibles asignando, a cada una de ellas, un cierto índice de deseabilidad, determinado según ciertas hipótesis sobre la racionalidad esperada del decisor. A partir de aquí, recurriendo a técnicas matemáticas, se define la solución óptima al problema de decisión.

La economía clásica ha identificado el beneficio como el objetivo empresarial por excelencia. Esta visión resulta simplista desde el punto de vista actual de la Economía de Empresa, en el que se consideran múltiples los objetivos a alcanzar por parte de la empresa y cada uno de estos objetivos puede determinar líneas de actuación distintas.

Distintos autores de estos modelos (Riggs, Simon, etc...) destacan dos graves anomalías en el modelo monocriterio:

- 1) En muchas situaciones reales, los centros decisores desean ordenar las alternativas en base a diferentes criterios que reflejan sus preferencias.
- 2) La caracterización del conjunto factible por medio de restricciones algebraicas que no pueden violarse en ningún caso, no es en absoluto realista.

Considerar un único criterio para fundamentar una decisión tiene la ventaja de contribuir a un planteamiento matemáticamente correcto del problema. Por otra parte, el problema así planteado no tiene por qué ser una buena representación de la realidad a la que se pretende hacer referencia por dos motivos fundamentales:

- 1) La comparación de varias alternativas rara vez se hace considerando un único criterio.
- 2) Las preferencias sobre un criterio son, en numerosos casos, difícilmente representables en un modelo.

En la decisión multicriterio los resultados obtenidos van a depender, no solamente de cuál haya sido la formulación del problema, sino también del procedimiento para encontrar los criterios.

2.2. Modelos multicriterio.

Un problema de decisión multicriterio se considera problema multicriterio cuando existen al menos dos criterios en conflicto y al menos dos alternativas de solución, el decisor se enfrenta a múltiples alternativas y a múltiples atributos (o criterios de decisión) de éstas.

Existen dos tipos de problemas multicriterio: continuos y discretos. El problema de tipo continuo se caracteriza por un conjunto de alternativas factibles infinitas, mientras que el problema de tipo discreto contiene un conjunto finito de alternativas válidas.

Este proyecto se centra en el tipo de problemas de decisión multicriterio discreto, en concreto el método de ayuda a la decisión multicriterio ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité) sugerido por Benayoun, Roy y Sussman y, posteriormente, desarrollado por Roy en 1968.

El método ELECTRE acepta la incomparabilidad entre alternativas (para alternativas a , b y c , si a es preferido a b y b es preferido a c , no podemos afirmar que a es preferido a c).

Con el método ELECTRE se busca construir una relación denominada de superación, que representa las preferencias del decisor sólidamente establecidas y, posteriormente, explorar la relación de superación con vistas a ayudar al decisor a resolver el problema.

Estos métodos constituyen instrumentos para obtener una preselección de grupos de alternativas muy amplios. El tamaño del conjunto de soluciones eficientes se divide en subconjuntos de alternativas más y menos favorables. El modelo de la relación de superación consiste en admitir, para cualquier par de alternativas a y b , que una supera a la otra cuando son satisfechas una condición de concordancia y una de discordancia. La concordancia cuantifica el grado de dominación de la alternativa a sobre la alternativa b y la discordancia cuantifica el grado de no-dominación de éstas.

3. Teoría y metodología ELECTRE I y IV.

3.1. Método ELECTRE I.

El método ELECTRE I consiste en un procedimiento para reducir el tamaño del conjunto de soluciones. Tal reducción se realiza por medio de una partición del conjunto en un subconjunto de alternativas más favorables para el centro decisor y en otro subconjunto de alternativas menos favorables.

La empresa se enfrenta a la elección de una inversión entre varias alternativas, para simplificar se muestra el ejemplo con dos, a_j y a_k , considera m factores relevantes de criterios de decisión y le otorga una ponderación w_i a cada uno de ellos. Por último, se considera que el valor numérico que la alternativa j tiene respecto de la i se denota por P_{ij} .

Este método utiliza dos índices que sintetizan la información de las comparaciones por parejas de los valores P_{ij} y P_{ik} . Estos índices afirman que una alternativa a_j es mejor que a_k cuando las valoraciones en la mayoría de los criterios son mejores; y que, en aquellos que no es mejor, no lo es de forma notoria.

El índice de concordancia (IC_{jk}) entre las alternativas a_j y a_k se calcula mediante la siguiente expresión (1):

$$IC_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i}{\sum_{i=1}^m w_i} (\forall P_{ij} \geq P_{ik}) \quad (1)$$

Este índice toma valores comprendidos entre 0 y 1. Cuanto mayor es el valor del índice, mejor es la alternativa a_j frente a la alternativa a_k . Si el índice toma valor 1, esto significa que la alternativa a_j es superior a la alternativa a_k en todos los criterios considerados. Por el contrario, si tiene el valor 0 indica que no es mejor en ninguno de ellos. Con los resultados obtenidos se compone la matriz de concordancia.

El índice de discordancia para ese par de alternativas a_j y a_k (ID_{jk}) se calcula, para aquellos factores en los cuales la alternativa a_j no domina a la alternativa a_k , como el mayor de los cocientes entre la diferencia en la puntuación para un factor i entre a_j y a_k y la amplitud total de la escala considerada para ese factor (TE_i), de acuerdo con la siguiente expresión (2):

$$ID_{jk} = \max_i \left[\frac{P_{ik} - P_{ij}}{TE_i} \right] (\forall P_{ij} \leq P_{ik}) \quad (2)$$

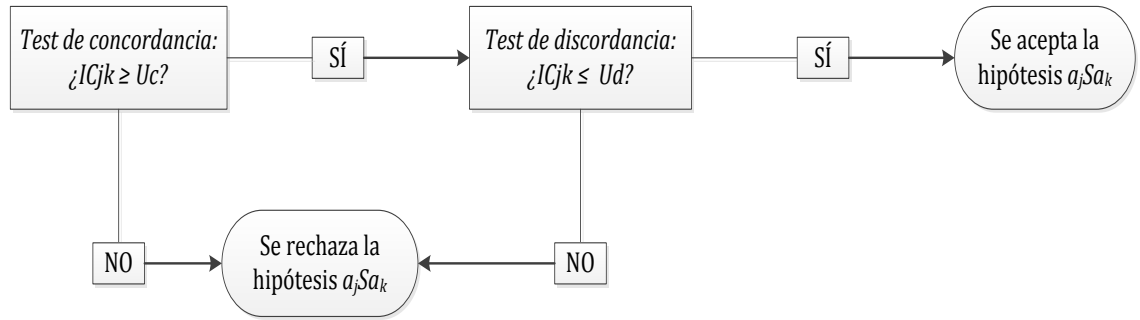
El índice de discordancia toma valores comprendidos entre 0 y 1, resultando el valor 0 cuando la alternativa a_j no es inferior en factor alguno a la alternativa a_k (lo que implica que IC_{jk} ha de ser 1) y siendo 1 cuando, en al menos un factor, la diferencia a favor de la alternativa a_k es la totalidad de la escala. Con los resultados obtenidos se compone la matriz de discordancia.

Para finalizar el método se han de definir dos umbrales. Uno de ellos es el umbral de concordancia, U_c , que expresa el mínimo valor de concordancia requerido para que la propuesta " a_j supera a a_k " no sea rechazada. El siguiente umbral es el umbral de discordancia, U_d , que expresa el máximo valor de discordancia tolerado para que la hipótesis " a_j supera a a_k " no sea rechazada.

Para realizar el análisis de robustez se ha de variar los valores de los umbrales de concordancia y discordancia.

Se muestra el proceso del método ELECTRE I (Gráfico 3):

Gráfico 3: Proceso del método ELECTRE I



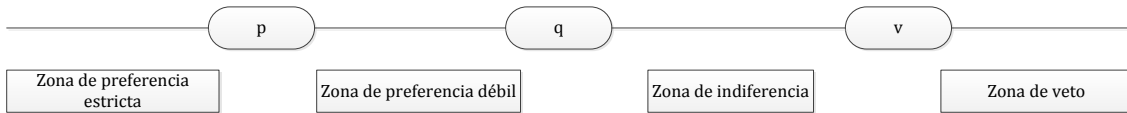
3.2. Método ELECTRE IV.

Este método posee dos variaciones importantes respecto al método anteriormente descrito:

- No hay que atribuir pesos a los atributos.
- No existe hipótesis inicial de superación, que hace inservibles las nociones de concordancia y de discordancia.

El método ELECTRE IV utiliza pseudo-criterios, es decir, criterios asociados a un umbral de indiferencia (q_j), un umbral de preferencia estricta (p_j) y un umbral de veto (v_j), representados en gráfico 4.

Gráfico 4: Umbrales y zonas de ELECTRE IV



Una vez definidos estos pseudo-criterios, se definen también las notaciones necesarias para la comparación dos a dos de las alternativas y la construcción de la relación de superación:

- $m_p(a_i, a_k)$: número de atributos para los que a_i es estrictamente preferido a a_k .
- $m_q(a_i, a_k)$: número de atributos para los que a_i es débilmente preferido a a_k .
- $m_{in}(a_k, a_i)$: número de atributos para los que a_i y a_k son considerados como indiferentes. Ante pequeñas diferencias en la valoración, esta modelización prefiere considerarlas como indiferentes.
- $m_0(a_i, a_k)$: número de atributos para los que a_i y a_k tienen la misma evaluación.

Se debe verificar, de acuerdo con la relación siguiente, siendo m la suma total de atributos:

$$m = m_p(a_i, a_k) + m_q(a_i, a_k) + m_0(a_i, a_k) + m_{in}(a_k, a_i) + m_q(a_k, a_i) + m_p(a_k, a_i)$$

Como el objetivo final del método ELECTRE IV es una ordenación de las alternativas de la mejor a la menos buena, es necesario partir de una matriz en la que se indica el grado de credibilidad que se le otorga a la *relación de superación* entre cada par de alternativas.

Estos grados de credibilidad se cuantifican de acuerdo con la posición de los valores de cada alternativa respecto al *gráfico 4*, siendo 1 cuando el valor de la alternativa esté en la *zona de preferencia estricta* y 0 cuando esté en la *zona de veto*, disminuyendo progresivamente a lo largo de las zonas de preferencia estricta a veto.

Una vez se realiza la matriz de grados de credibilidad, se debe realizar dos destilaciones, una destilación descendente y otra destilación ascendente. Para ello, se definen los *umbrales de discriminación*. Estos *umbrales de discriminación* determinarán los *intervalos de discriminación*, que serán claves para los *preordenes parciales*, que se obtienen del resultado de las destilaciones.

Para realizar la destilación descendente se parte del mayor valor de la matriz de grados de credibilidad. A continuación se observa si hay algún valor de grados de credibilidad de las otras alternativas entre el valor máximo y el intervalo de discriminación. Para todas las alternativas que su grado de credibilidad esté comprendido entre el valor máximo y el intervalo de discriminación se dice que superan a la alternativa con la que se compara, por lo tanto, pasan a formar parte de la primera destilación. Para ellas se calcula su cualificación, como la diferencia entre el número de alternativas a las que supera menos el número de alternativas que la superan.

El proceso continúa de forma diferente según los resultados obtenidos en la primera destilación. Si la primera destilación tiene una sola alternativa, el proceso se repite con el resto de alternativas con un nuevo valor de umbral de discriminación menor. Si la primera destilación está compuesta por varias alternativas, se repite el proceso de destilación sólo con ellas antes de pasar a aplicarlo al resto. Estos pasos se repiten sucesivamente hasta que se obtiene una ordenación de todas las alternativas atendiendo a un criterio de superación.

El proceso de destilación ascendente es similar, pero en sentido contrario y, por lo tanto, la ordenación que se obtiene se interpreta en sentido contrario.

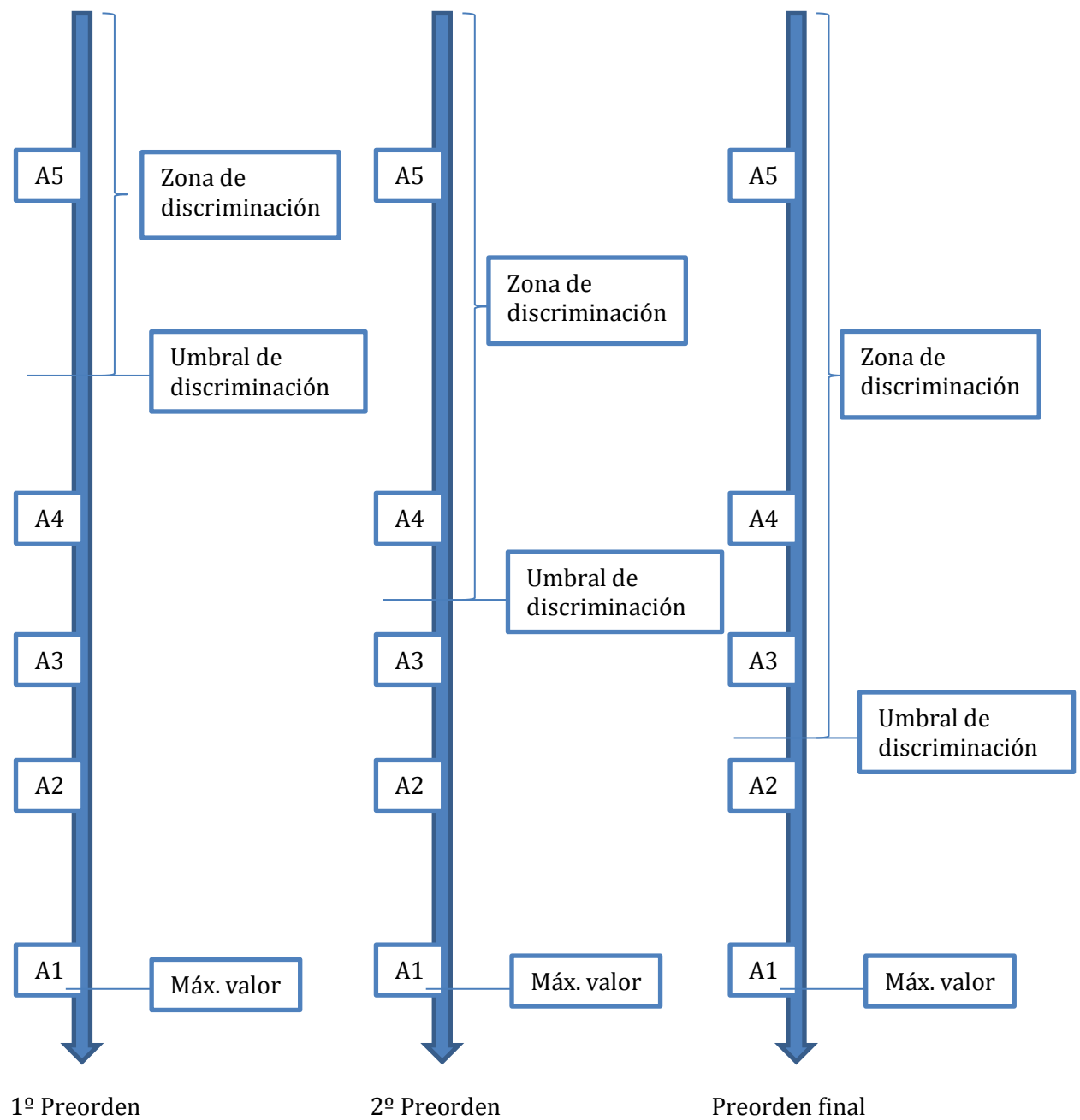
Para realizar el preorden parcial final se tiene en cuenta lo siguiente:

- Si a_i es preferida a a_k en los dos preordenes completos, entonces también lo será en el preorden parcial final.
- Si a_i es equivalente a a_k en un preorden completo, pero es preferida en el segundo, entonces a_i será preferida a a_k en el preorden parcial final.
- Si en el primer preorden a_i es preferida a a_k y si en el segundo a_k es preferida a a_i , entonces las dos acciones serán incomparables en el preorden parcial final.

Para realizar el análisis de robustez se variarían los valores de los umbrales de indiferencia, preferencia estricta y veto.

Se observa en el *gráfico 5* la forma de proceder del algoritmo:

Gráfico 5: Procedimiento del algoritmo ELECTRE IV.



4. Aplicación práctica de la metodología ELECTRE.

Explicados los conceptos teóricos se procede a la aplicación práctica de ellos.

Lo primero que se ha de nombrar es que todos los valores introducidos en los cálculos posteriores se han realizado de manera objetiva, evaluándolos una vez realizadas las visitas y reuniones, antes citadas.

La empresa en cuestión debía renovar un activo obsoleto, una máquina de corte por plasma para el procesado de los distintos tipos de acero. Esta máquina se compone de una mesa de trabajo, de dimensiones comerciales, y de un pórtico con un cabezal de corte por plasma, el cual es el que procesa el material. Este cabezal se puede elegir de distinta potencia. A continuación se muestran unas fotos de la máquina estudiada y adquirida.





4.1. Aplicación del método ELECTRE I.

Mediante el método ELECTRE I se elegirá un grupo de configuraciones técnicas más apropiadas para el proceso productivo de la empresa, dentro de lo comercialmente posible, estudiando y analizando los valores de las alternativas y de los atributos desde un punto de vista técnico.

Un primer punto a analizar es qué dimensiones son necesarias para el proceso productivo dentro de las limitaciones logísticas que la empresa posee. Estas limitaciones se basan en las dimensiones de la mesa de trabajo, comprendida en un máximo de 24 metros por 3 metros útiles de trabajo. Otro punto a estudiar es la potencia de la máquina, se distingue comercialmente en la potencia de amperaje del generador de plasma, cuanto más amperaje mayor es el espesor del acero que se puede cortar. En este proyecto estudiaremos dos tipos de plasma caracterizados por su potencia (datos precisos de ellos en Anexos):

- HPR400xd: potencia de 400 Amperios.
- HPR260xd: potencia de 260 Amperios.

El siguiente punto es la cantidad de sopletes que debe poseer la máquina, estos pueden ser uno o dos sopletes. Para cada configuración se estudiará cuál es la más adecuada para la empresa.

4.1.1. Configuraciones técnicas.

Explicados los tres puntos importantes de esta parte del proyecto se procede a mostrar las distintas alternativas de configuración técnica a analizar (*Tabla 1*):

Tabla 1: Tabla de configuraciones técnicas posibles

Alternativa	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Sopletes	1	1	1	1	2	2	2	2
Potencia (A)	400	400	260	260	400	400	260	260
Dimensiones (m)	12x3	24x3	12x3	24x3	12x3	24x3	12x3	24x3

Los distintos atributos con los que se evaluará a las alternativas anteriores son los siguientes (se valoran entre 0-1 por su importancia técnica, todos los valores son a maximizar):

- Productividad
 - Definición: cantidad de espesores de chapa que es capaz de cortar. La empresa quiere procesar los espesores comerciales de acero en este tipo de máquina: 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45, 50 mm.
 - El valor se incrementa 1/20 por cada espesor que pueda cortar.
 - El valor varía si se pueden procesar una o dos chapas de formato comercial 12x2,5 metros: si se puede procesar uno se multiplica por 1 si se pueden procesar dos, se multiplica por 1,5 el valor de antes.
 - W(peso): 0,50
- Aprovechamiento materia prima
 - Definición: Al realizar un anidado (colocación de las piezas a producir en el formato de chapa), el porcentaje de materia prima utilizada. Un alto porcentaje de trabajos con piezas de espesor superior a 30 ó 35 mm de espesor, tienen un mayor porcentaje de aprovechamiento materia prima, por la geometría de las piezas. Si la potencia es HPR400xd se multiplica por 1,2 y si es HPR260xd se multiplica por 1.
 - W(peso): 0,30
- Velocidad de corte
 - Definición: velocidad de corte de la máquina combinado con el número de sopletes y longitud de la mesa. Este punto es difícil evaluarlo, no por tener dos sopletes se corta el doble de rápido, ya que esto depende del trabajo que demande el cliente. Se ha calculado, por experiencia, que actualmente un 80% es trabajo para un soplete. Se utiliza de valor la velocidad de corte en acero al carbono en chapa de 20mm para realizar la comparación. El HPR260xd es de 2200 mm/min y el HPR400xd es de 2900 mm/min, estos valores los multiplicamos por 1,2 en las configuraciones de dos sopletes y por 1,3 si la mesa es de longitud 24 metros.
 - W(peso): 0,20

4.1.2. Evaluación de las alternativas respecto los atributos.

Se realiza la evaluación de las alternativas y los atributos, la matriz resultante es la siguiente (Tabla 2):

Tabla 2: Tabla de alternativas de configuración

Atributos	Alternativas								PESOS
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	
Productividad	20	30	16	24	20	30	16	24	0,5
Aprov. M.P.	0,96	0,96	0,8	0,8	0,96	0,96	0,8	0,8	0,3
V. corte	2900	3770	2200	2860	3480	4524	2640	4524	0,2

A continuación se procede a la normalización, en base 0-1, de los valores para implementarlos en el algoritmo de ELECTRE I (Tabla 3):

Tabla 3: Tabla de alternativas de configuración normalizadas

Atributos	Alternativas							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
Productividad	0,67	1,00	0,53	0,80	0,67	1,00	0,53	0,80
Aprov. M.P.	1,00	1,00	0,83	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83
V. corte	0,64	0,83	0,49	0,63	0,77	1,00	0,58	1,00

4.1.3. Índices de concordancia y discordancia.

Se realiza la matriz de índices de concordancia y de discordancia (Tabla 4 y Tabla 5):

Tabla 4: Tabla de índices de concordancia

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
E1	-	0,3	1,0	0,5	0,8	0,3	1,0	0,3
E2	1,0	-	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	0,8
E3	0,0	0,0	-	0,3	0,0	0,0	0,8	0,8
E4	0,5	0,0	1,0	-	0,5	0,0	1,0	0,8
E5	1,0	0,3	1,0	0,5	-	0,3	1,0	0,3
E6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0
E7	0,0	0,0	1,0	0,3	0,0	0,0	-	0,3
E8	0,7	0,2	1,0	1,0	0,7	0,2	1,0	-

Tabla 5: Tabla de índices de discordancia

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
E1	-	0,3	0,0	0,1	0,1	0,4	0,0	0,4
E2	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2
E3	0,2	0,5	-	0,3	0,3	0,5	0,1	0,5
E4	0,2	0,2	0,0	-	0,2	0,4	0,0	0,0
E5	0,0	0,3	0,0	0,1	-	0,3	0,0	0,2
E6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0
E7	0,2	0,5	0,0	0,3	0,2	0,5	-	0,4
E8	0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	-

4.1.4. Umbrales de concordancia y discordancia. Soluciones.

Con los índices de concordancia y discordancia se procede a definir los umbrales de concordancia y de discordancia para dar por finalizado el estudio mediante el ELECTRE I. Para este caso se definen los umbrales mencionados con los siguientes valores:

- U_c : 0,8
- U_d : 0,2

Para estos índices se obtiene un resultado de dos alternativas: la alternativa E2 y E6.

Para certificar el resultado obtenido se realiza un análisis de robustez modificando los valores de los umbrales previamente seleccionados, estos nuevos valores son:

- U_c : 0,7
- U_d : 0,3

Con esta modificación de valores se obtiene el mismo resultado, las alternativas E2 y E6, por lo tanto, podemos afirmar que el estudio es robusto. Éstas se pueden distinguir en el gráfico 6.

Gráfico 6: Diagrama de las soluciones del método ELECTRE I

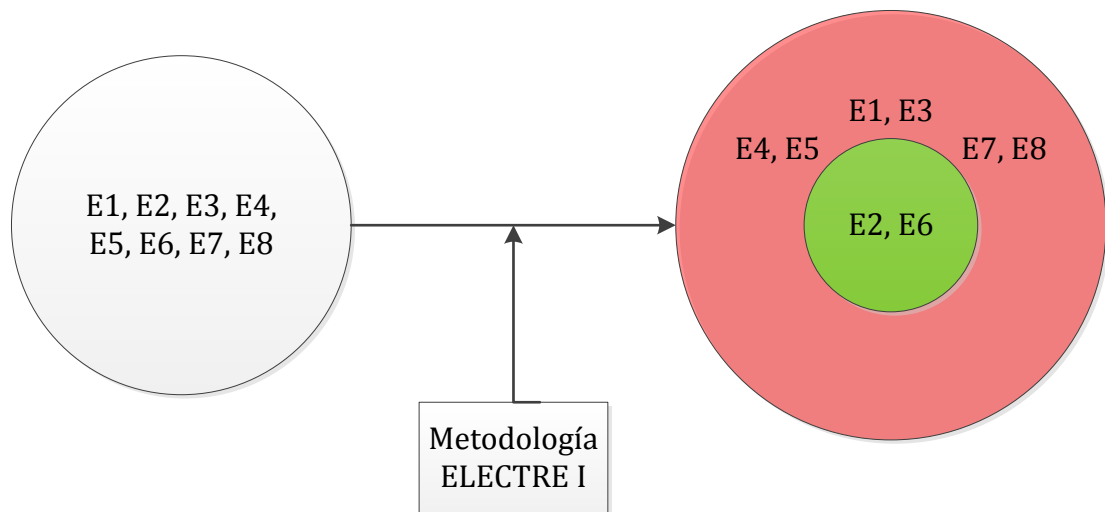


Tabla 6: Tabla de las configuraciones técnicas resultantes

	E2	E6
Sopletes	1	2
Potencia (A)	400	400
Dimensiones (m)	24x3	24x3

Con los resultados obtenidos se procede a implementar el algoritmo del ELECTRA IV para estudiar a los distintos proveedores del mercado.

4.2. Aplicación del método ELECTRE IV.

Con la obtención de las dos mejores alternativas mediante la aplicación del ELECTRE I, se continúa el estudio aplicando la versión ELECTRE IV.

Para aplicar el método se hace uso de una herramienta informática, un software específico elaborado en el laboratorio LAMSADE de la universidad de Paris-Dauphine, llamado *ELECTRE III/IV*.

A continuación se definen los atributos de compra y las alternativas de los proveedores de máquinas de corte por plasma más integrados en España.

4.2.1. Atributos de compra.

Se valoran entre 0-1, todos los valores son a maximizar, salvo el de coste que es a minimizar.

- **Coste:** Importe de la máquina.
- **Calidad de corte:** Calidad del acabado final y la geometría de la pieza de muestra.
- **Servicio técnico:** Atención y proximidad del servicio técnico.
- **Comercialización de los componentes:** Se busca que los componentes de la máquina sean universales. Tener una amplia cartera de proveedores.
- **Estructura de la máquina:** Se busca una máquina que va a trabajar varias horas al día, se necesita que su estructura sea robusta.
- **Facilidad de uso del CNC:** Sencillez del control numérico para que cualquier trabajador pueda operar con ella.
- **Integración de la marca en el sector:** Fondo de mercado de la empresa.

4.2.2. Alternativas de compra.

- Messer (Marca alemana)
- Tecoi (Marca española)
- Praxair (Marca española)
- Esab (Marca alemana)

4.2.3. Tablas de datos.

Los datos recogidos de los distintos atributos de las alternativas se muestran en la *Tabla 6*, donde las alternativas se han definido como la marca del proveedor y la alternativa resultante del cálculo del ELECTRA I:

Tabla 6: Datos recogidos para el ELECTRE IV.

Atributos	Alternativas							
	Messer-E2	Tecoi-E2	Esab-E2	Praxair-E2	Messer-E6	Tecoi-E6	Esab-E6	Praxair-E6
Coste (€)	275000	245000	242000	227000	372000	294700	270000	277000
Calidad de corte	0,9	0,8	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7
Servicio técnico	0,6	0,7	0,4	0,9	0,6	0,7	0,4	0,9
Comercialización componentes	0,7	1	0,3	1	0,7	1	0,3	1
Estructura de la máquina	0,8	0,9	0,8	0,75	0,8	0,9	0,8	0,75
Facilidad de uso del CNC	0,7	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7
Integración en el sector	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5

Para introducir los datos en el sistema informático se deben normalizar, resultando los valores de la *Tabla 7*:

Tabla 7: Valores normalizados para aplicar el método ELECTRE IV.

Atributos	Alternativas							
	Messer-E2	Tecoi-E2	Esab-E2	Praxair-E2	Messer-E6	Tecoi-E6	Esab-E6	Praxair-E6
Coste	1,21	1,08	1,07	1,00	1,64	1,30	1,19	1,22
Calidad de corte	1,00	0,89	0,89	0,78	1,00	0,89	0,89	0,78
Servicio técnico	0,67	0,78	0,44	1,00	0,67	0,78	0,44	1,00
Comercialización componentes	0,70	1,00	0,30	1,00	0,70	1,00	0,30	1,00
Estructura de la máquina	0,89	1,00	0,89	0,83	0,89	1,00	0,89	0,83
Facilidad de uso del CNC	0,78	0,89	1,00	0,78	0,78	0,89	1,00	0,78
Integración en el sector	0,86	1,00	0,57	0,71	0,86	1,00	0,57	0,71

Los umbrales de preferencia, indiferencia y veto que aplicaremos para la implementación del algoritmo son los siguientes (*Tabla 11*):

Tabla 11: Valores de preferencia, indiferencia y veto.

	Maximizar	Minimizar
p	0,85	1
q	0,7	1,08
v	0,5	1,12

4.2.4. Implementación en el software.

Para analizar los valores asignados a los atributos de las alternativas se hará uso de un software específico para los modelos ELECTRE, el software se denomina ELECTRE III/IV.

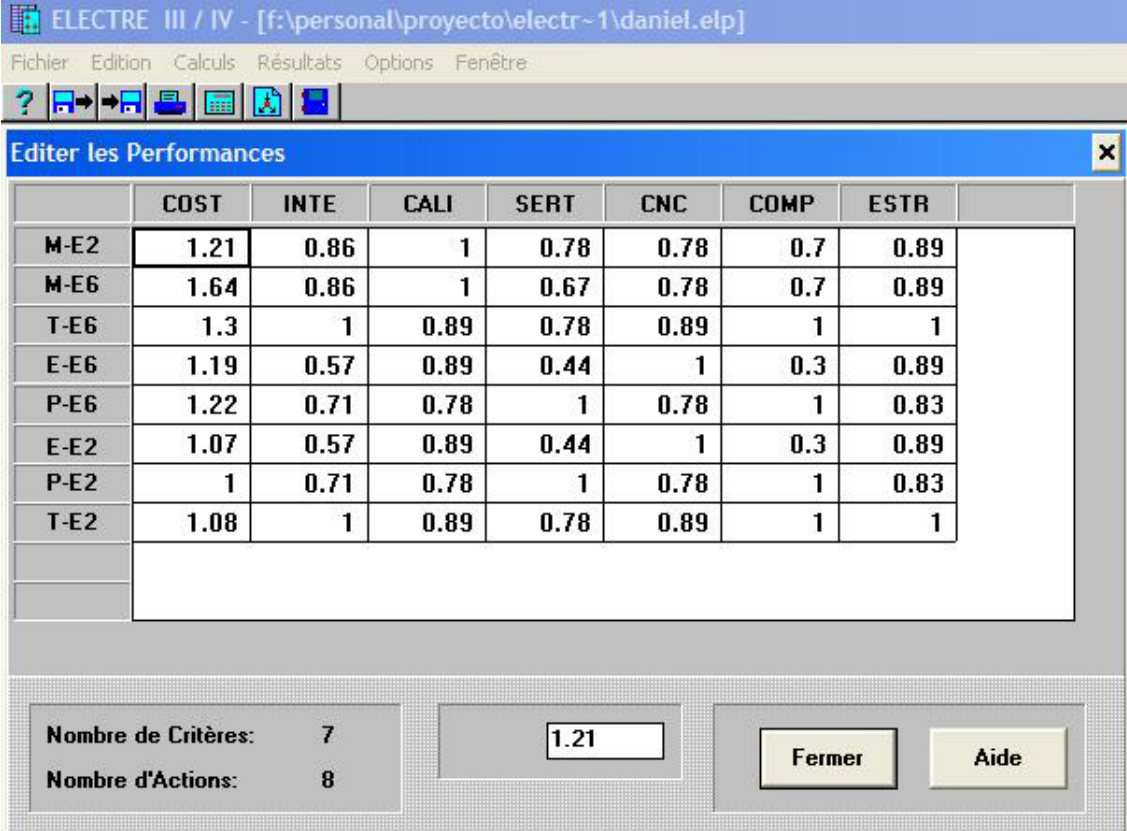
En el programa se introducen los valores normalizados de cada alternativa y los valores específicos de preferencia, indiferencia y veto, y muestra una ordenación de las alternativas.

La tabla base de valores normalizados es la siguiente (*Tabla 12*):

Dónde:

- Cada alternativa se denomina con la inicial del nombre del proveedor y la alternativa resultante del ELECTRE I, por ejemplo, P-E6 es Praxair referente a la alternativa E6 del ELECTRE I (dos sopletes, 400 amperios de potencia y 24x3 metros de dimensión de mesa de corte).
- Los atributos están abreviados por falta de espacio en el software.

Tabla 12: Tabla de valores implementados en el programa ELECTRE III/IV.




The screenshot shows the 'ELECTRE III / IV' software window. The title bar indicates the file path: [f:\personal\proyecto\electr~1\daniel.elp]. The menu bar includes 'Fichier', 'Edition', 'Calculs', 'Résultats', 'Options', and 'Fenêtre'. The toolbar contains icons for help, file operations, and calculations. The main window is titled 'Editer les Performances' and displays a table with 8 columns: 'COST', 'INTE', 'CALI', 'SERT', 'CNC', 'COMP', 'ESTR', and an empty column. The table lists 8 alternatives: M-E2, M-E6, T-E6, E-E6, P-E6, E-E2, P-E2, and T-E2. The values are normalized and range from 0.3 to 1.21. At the bottom, there are fields for 'Nombre de Critères: 7' and 'Nombre d'Actions: 8', a text box with '1.21', and buttons for 'Fermer' and 'Aide'.

	COST	INTE	CALI	SERT	CNC	COMP	ESTR
M-E2	1.21	0.86	1	0.78	0.78	0.7	0.89
M-E6	1.64	0.86	1	0.67	0.78	0.7	0.89
T-E6	1.3	1	0.89	0.78	0.89	1	1
E-E6	1.19	0.57	0.89	0.44	1	0.3	0.89
P-E6	1.22	0.71	0.78	1	0.78	1	0.83
E-E2	1.07	0.57	0.89	0.44	1	0.3	0.89
P-E2	1	0.71	0.78	1	0.78	1	0.83
T-E2	1.08	1	0.89	0.78	0.89	1	1

Ejecutando el programa se ofrece como resultado la siguiente ordenación (*Tabla 13*):

Tabla 13: Ordenación de las alternativas en el programa ELECTREII/IV.



Rang	Action
1	T-E2
2	T-E6
3	M-E2
4	P-E2
5	M-E6
6	E-E2
7	E-E6
8	P-E6


Se realiza el análisis de robustez modificando los valores de preferencia, indiferencia y veto a los siguientes valores en la *tabla 14*:

Tabla 14: Datos para el análisis de robustez.

	Maximizar	Minimizar
p	0,7	1,08
q	0,5	1,15
v	0,2	1,25

Se obtienen los siguientes resultados (*Tabla 15*):

Tabla 15: Análisis de robustez.



Rang	Action
1	T-E2
2	T-E6
3	M-E2
4	P-E2
5	M-E6
6	P-E6 E-E2
7	E-E6

Después de realizarse el análisis de robustez podemos afirmar que la mejor alternativa para las necesidades de la empresa es la alternativa E2, con las características descritas en la *tabla 16*:

Tabla 16: Tabla de las configuraciones técnicas resultantes.

E2	
Sopletes	1
Potencia (A)	400
Dimensiones (m)	24x3

5. Análisis de las mejoras obtenidas.

Los resultados obtenidos se analizan comparando tres trabajos periódicos que la empresa tiene. Se contrastan las mejoras en mano de obra con el ratio horas por tonelada (H/Tm). Las comparaciones se harán con los tiempos que invertía el activo obsoleto frente a los tiempos que invierte el nuevo.

La máquina sustituida se trata de una máquina de corte por plasma adquirida en el año 2000, está posee 2 sopletes de 200 Amperios de potencia y una mesa de trabajo de 15 metros.

Se puede observar la evolución del ratio (H/Tm) en la *tabla 17*:

Tabla 17: Tabla del ratio (H/Tm)

Trabajo 1		
	Antes	Ahora
Toneladas	3,672	3,672
Tiempo (H)	3,16	1,16
Ratio (H/Tm)	0,86	0,32
Reducción (%)	63%	
Trabajo 2		
	Antes	Ahora
Toneladas	20,05	28,65
Tiempo (H)	14,58	13,58
Ratio (H/Tm)	0,73	0,47
Reducción (%)	35%	
Trabajo 3		
	Antes	Ahora
Toneladas	17	6,97
Tiempo (H)	16,67	5,25
Ratio (H/Tm)	0,98	0,75
Reducción (%)	23%	

Se observa una reducción importante de los plazos de ejecución de los tiempos de proceso. Con esto la empresa logra un ajuste en los plazos de entrega y en los precios de la mano de obra, consiguiendo una alta competitividad frente a las empresas competidoras.

6. Conclusiones.

La elección de un activo importante para una empresa es una decisión compleja dado la necesidad de recursos que ello supone. Este proyecto ha tenido como finalidad la ayuda a la decisión mediante herramientas multicriterio, recayendo la decisión final a cargo de los órganos decisores de la empresa.

Para la aplicación de estas herramientas se tuvieron en cuenta los criterios técnicos marcados por la Dirección Técnica y su evaluación se llevó a cabo de manera objetiva, con los datos y demostraciones ofrecidas por los proveedores y el análisis realizado por los miembros de la empresa.

El trabajo se desarrolló durante 10 meses, planificando las distintas etapas que se iban a suceder en una tarea que requirió la constante coordinación entre distintos departamentos de la empresa.

La aplicación de la metodología seleccionada para ayudar en la decisión requirió en primer lugar de un proceso de consultas con expertos en materia de ayuda a la decisión y como consecuencia de ello se produce una constante retroalimentación entre la Dirección Técnica de la empresa y los encargados de la implementación del proyecto. Ese feedback positivo generado entre todas las partes ha permitido contar con los datos más exactos posibles y con las mayores garantías técnicas.

Con la aplicación de cada método se ha ido aplicando un filtro para las alternativas existentes logrando al final la mejor alternativa entre las analizadas. En el primer filtro se ha logrado reducir el tamaño de las alternativas estudiadas para pasar de ocho alternativas a dos alternativas posibles. Las dos alternativas han sido con uno y con dos sopletes y para ambas 24 metros de mesa útil. En el segundo filtro se ha elegido la mejor alternativa para la empresa, mediante la evaluación de los proveedores analizados. Ésta ha sido la alternativa con un soplete y 24 metros de mesa útil, que es la que finalmente adquirió e instaló la empresa.

Una vez analizadas las mejoras obtenidas, se deduce que la adquisición ha supuesto una mejora en los tiempos de fabricación; logrando así un coste de mano de obra menor y competitividad en los precios frente a la competencia.

La gran mayoría de empresas debe renovar sus activos periódicamente para poder hacer frente a las exigencias de los clientes, los cuales exigen la máxima Calidad y recursos que el mercado les ofrece. Para ello, existen herramientas de ayuda a la decisión, como la implantada en este proyecto, que ayudan a los Centros Decisores a elegir la mejor alternativa de acuerdo a los criterios técnicos, financieros y de cualquier organismo de la empresa.

Una vez realizada la inversión e instalación del activo, la empresa ha quedado muy satisfecha de los resultados obtenidos, siendo este proyecto la vía de actuación para futuras adquisiciones con recursos similares a la que se expone en este proyecto.

7. Bibliografía.

- ANTONIO MUÑOZ PORCAR (2008). *“Tesis: Localización empresarial y ventaja competitiva. Aplicación a las comarcas aragonesas”*.
- CARLOS ROMERO (1996). *“Análisis de las decisiones multicriterio”*.
- DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS (2009). *“Manual de organización de empresas Tomo III”*.
- LUCÍA ISABEL GARCÍA CEBRIÁN, ANTONIO MUÑOZ PORCAR (2009). *“Localización empresarial en Aragón”*.

8. Anexos.

- Teoría completa del modelo de ayuda a la decisión ELECTRE IV.
- Características de los modelos de plasma HPRXXX, de la marca Hypertherm.
- Resultados ampliados del software de simulación del ELECTRE III/IV.