



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

**Implementación en Microsoft Excel ® de  
métodos de toma de decisión multiatributo**

**Autor:**

**Castrillo Boderó, Natalia**

**Tutor:**

**Gento Municio, Ángel Manuel  
Pascual Ruano, José Antonio**

**Departamento**

**Organización de Empresas y  
Comercialización e Investigación  
de Mercados**

**Valladolid, Febrero, 2017.**



## **Agradecimientos**

*En primer lugar, agradecer a mi tutor, Ángel Gento, su ayuda y dedicación, sin olvidar su paciencia, para sacar este Trabajo Fin de Grado adelante.*

*A mis padres, que me inculcaron los valores y proporcionaron las herramientas para convertirme en la persona que soy hoy, dándome ánimos y su apoyo incondicional para cumplir mis metas profesionales y personales. Y a mi hermano, por escucharme y ayudarme cada vez que lo necesité.*

*A mis compañeros, que ya no puedo llamarles de otra forma que amigos, por encargarse de que mi paso por esta escuela haya sido una época inolvidable en mi vida. Y a mis amigos, por acompañarme en todo lo que me he propuesto, confiando en mis capacidades en cada momento.*

*Por último, a todos aquellos profesores que a lo largo de estos cuatro años me han proporcionado su experiencia y formación, para poder estar más cerca de ser ingeniera.*



## Resumen

La sociedad actual se caracteriza por la gran cantidad de información que nos rodea, por ello resulta clave la ayuda que nos prestan los métodos de toma de decisión. Gracias a estas herramientas logramos definir, estructurar y establecer prioridades ante problemas de cualquier índole que resulten demasiado complejos.

En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrollan las diferentes metodologías para la toma de decisión mediante la programación en Microsoft Excel ® de las mismas. El resultado deseado radica en conocerlas e implementarlas, así como, disponer de una matriz de toma de decisión para la resolución de problemas generalizados por cualquier usuario.

## Palabras clave

Decisión: proceso de selección y ejecución de una acción que dé respuesta a un problema y permita la consecución de unos objetivos predeterminados (Diez de Castro et al., 1997).

Decisor: individuo responsable de la recopilación de información, elección de criterios a utilizar, valoración de las alternativas ante el problema expuesto y elección de una de ellas.

Alternativa: posible solución ante el problema planteado. Para este tipo de análisis las alternativas serán diferentes y excluyentes.

Atributo o criterio: principio de evaluación que debe ser considerado para la elección de una alternativa.

Peso: valor asignado a un criterio mediante el cual conocemos la relevancia del mismo frente a los demás. En este caso emplearemos tanto el método de asignación directa como el ponderado.



# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....                        | 17 |
| 1.1   | Motivación .....                          | 17 |
| 1.2   | Objetivos del proyecto .....              | 17 |
| 1.2.1 | Objetivo principal .....                  | 17 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos.....                | 17 |
| 1.3   | Alcance del proyecto.....                 | 18 |
| 1.4   | Estructura del tema .....                 | 19 |
| 2     | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN .....  | 21 |
| 2.1   | Historia de la toma de decisión .....     | 21 |
| 2.2   | Estado del arte .....                     | 27 |
| 2.3   | ¿Qué entendemos por decisión? .....       | 28 |
| 2.3.1 | Definición .....                          | 28 |
| 2.3.2 | Tipologías .....                          | 29 |
| 2.3.3 | Agentes en el proceso de decisión.....    | 30 |
| 2.4   | Proceso de toma de decisión.....          | 30 |
| 2.4.1 | Definición del problema .....             | 32 |
| 2.4.2 | Definición de los criterios.....          | 32 |
| 2.4.3 | Generación de acciones viables.....       | 33 |
| 2.4.4 | Evaluación de acciones viables.....       | 33 |
| 2.4.5 | Selección de acciones viables.....        | 34 |
| 2.4.6 | Implantación y control.....               | 35 |
| 2.5   | Normalización .....                       | 35 |
| 2.5.1 | Según % del máximo .....                  | 36 |
| 2.5.2 | Según % del total.....                    | 36 |
| 2.5.3 | Según % del rango.....                    | 37 |
| 2.5.4 | Según Vector Unitario.....                | 37 |
| 3     | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS ..... | 39 |
| 3.1   | Método de dominancia.....                 | 39 |
| 3.2   | Método MAX-MIN .....                      | 40 |
| 3.3   | Método MAX-MAX.....                       | 40 |
| 3.4   | Método conjuntivo .....                   | 41 |
| 3.5   | Método Disyuntivo .....                   | 42 |
| 3.6   | Método lexicográfico.....                 | 42 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.7    | Método de Suma Ponderada .....           | 43  |
| 3.8    | Método de Producto Ponderado .....       | 44  |
| 3.9    | Método de Asignación lineal .....        | 45  |
| 3.10   | Método TOPSIS.....                       | 46  |
| 3.11   | Método AHP .....                         | 49  |
| 3.11.1 | Introducción y características .....     | 49  |
| 3.11.2 | Fases del método AHP.....                | 51  |
| 3.12   | Método Electre I .....                   | 58  |
| 3.12.1 | Índice de concordancia .....             | 62  |
| 3.12.2 | Índice de Discordancia .....             | 63  |
| 3.12.3 | Grafo de superación .....                | 64  |
| 3.13   | Método Promethee I y II.....             | 65  |
| 3.13.1 | Introducción y evolución histórica ..... | 65  |
| 3.13.2 | Fases del método Promethee .....         | 65  |
| 3.13.3 | Promethee I: Ordenamiento Parcial .....  | 73  |
| 3.13.4 | Promethee II: ordenamiento completo..... | 73  |
| 3.13.5 | Plano GAIA .....                         | 74  |
| 4      | MANUAL DE PROGRAMADOR .....              | 77  |
| 4.1    | Matriz de decisión.....                  | 77  |
| 4.2    | Normalización .....                      | 80  |
| 4.2.1  | Transformación de criterios .....        | 80  |
| 4.2.2  | Tipos de normalización .....             | 80  |
| 4.3    | Dominancia .....                         | 82  |
| 4.4    | Max-Min .....                            | 84  |
| 4.5    | Max-Max .....                            | 86  |
| 4.6    | Conjuntivo.....                          | 87  |
| 4.7    | Disyuntivo .....                         | 89  |
| 4.8    | Lexicográfico .....                      | 90  |
| 4.9    | Suma Ponderada .....                     | 94  |
| 4.10   | Producto Ponderado .....                 | 96  |
| 4.11   | Asignación Lineal .....                  | 99  |
| 4.11.1 | Jerarquía Media .....                    | 99  |
| 4.11.2 | Jerarquía Equivalente.....               | 102 |
| 4.12   | TOPSIS.....                              | 104 |
| 4.13   | AHP.....                                 | 106 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.13.1 | Aproximación 1 .....                                       | 108 |
| 4.13.2 | Aproximación 2 .....                                       | 108 |
| 4.13.3 | Aproximación 3 .....                                       | 108 |
| 4.13.4 | Aproximación 4 .....                                       | 109 |
| 4.14   | Electre I .....  | 112 |
| 4.14.1 | Matriz de Concordancia.....                                | 113 |
| 4.14.2 | Matriz de Discordancia.....                                | 113 |
| 4.15   | Promethee I y II.....                                      | 121 |
| 4.15.1 | Promethee I.....   | 123 |
| 4.15.2 | Promethee II.....  | 124 |
| 5      | MANUAL DE USUARIO .....                                    | 129 |
| 5.1    | Presentación .....   | 129 |
| 5.2    | Introducción de datos.....                                 | 129 |
| 5.3    | Elección de método .....                                   | 132 |
| 5.4    | Dominancia .....   | 132 |
| 5.5    | Max-Min .....  | 133 |
| 5.6    | Max-Max .....  | 133 |
| 5.7    | Conjuntivo.....  | 134 |
| 5.8    | Disyuntivo .....   | 136 |
| 5.9    | Lexicográfico .....  | 136 |
| 5.10   | Suma Ponderada.....  | 137 |
| 5.11   | Producto Ponderado .....                                   | 138 |
| 5.12   | Asignación Lineal .....                                    | 139 |
| 5.13   | TOPSIS.....  | 140 |
| 5.14   | AHP.....   | 142 |
| 5.15   | Electre I .....  | 144 |
| 5.16   | Promethee I y II.....                                      | 146 |
| 5.16.1 | Promethee I.....   | 148 |
| 5.16.2 | Promethee II.....  | 148 |
| 6      | ESTUDIO ECONÓMICO.....                                     | 149 |
| 6.1    | Introducción.....  | 149 |
| 6.1.1  | Jerarquía en un proyecto Toma de Decisión .....            | 149 |
| 6.2    | Fases de desarrollo.....                                   | 151 |
| 6.3    | Estudio económico.....                                     | 153 |
| 6.3.1  | Horas efectivas anuales y tasas horarias de personal ..... | 154 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.3.2 | Cálculo de las amortizaciones para el equipo informático utilizado ..... | 155 |
| 6.3.3 | Coste del material consumible .....                                      | 156 |
| 6.3.4 | Costes indirectos .....  | 156 |
| 6.3.5 | Horas de personal dedicadas a cada fase del proyecto.....                | 157 |
| 6.4   | Costes asignados a cada fase del proyecto.....                           | 157 |
| 6.4.1 | Fase 1: decisión de elaboración del proyecto.....                        | 157 |
| 6.4.2 | Fase 2: presentación y difusión del proyecto.....                        | 158 |
| 6.4.3 | Fase 3: recopilación de información.....                                 | 159 |
| 6.4.4 | Fase 4: análisis, búsqueda y selección .....                             | 159 |
| 6.4.5 | Fase 5: escritura, difusión e implantación .....                         | 160 |
| 6.5   | Cálculo del coste total .....  | 160 |
| 6.6   | Diagrama de Gantt.....   | 161 |
| 7     | CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS .....                                 | 163 |
| 7.1   | Conclusiones .....   | 163 |
| 7.2   | Futuros desarrollos .....  | 164 |
| 8     | BIBLIOGRAFÍA .....   | 167 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 1: Ordenación Métodos Multiatributo (Chen & Hwang, 1992).....                       | 28  |
| Ilustración 2: Proceso de Toma de Decisión (Robbins, 1994).....                                 | 32  |
| Ilustración 3, Representación del método TOPSIS .....   | 47  |
| Ilustración 4. Estructura jerarquizada del método AHP (Ferris, 2005) .....                      | 52  |
| Ilustración 5: Elección de método Electre (Maystre, 1994) .....                                 | 61  |
| Ilustración 6: Resumen Filtros Promethee .....  | 70  |
| Ilustración 7: Grafo Outranking (Gironés, Madrid, & Valls, 2008).....                           | 72  |
| Ilustración 8: Flujos outranking, positivo y negativo (Gironés, Madrid, & Valls, 2008)<br>..... | 72  |
| Ilustración 9: Lista desplegable de criterios.....  | 77  |
| Ilustración 10: Transformación de criterios.....  | 78  |
| Ilustración 11: Elección de Método.....   | 78  |
| Ilustración 12: Ejemplo aplicado .....  | 78  |
| Ilustración 13: Matriz de Decisión.....   | 79  |
| Ilustración 14: Lectura de matriz .....   | 83  |
| Ilustración 15: Ejemplo Dominancia, Comparación de alternativas.....                            | 83  |
| Ilustración 16: Ejemplo Dominancia, Solución.....   | 84  |
| Ilustración 17: Normalización Max-Min .....   | 85  |
| Ilustración 18: Ejemplo Max-Min, Normalización.....   | 86  |
| Ilustración 19: Ejemplo Max-Min, Solución .....   | 86  |
| Ilustración 20: Elección de Normalización método Max-Max .....                                  | 87  |
| Ilustración 21: Ejemplo Max-Max, Normalización .....  | 87  |
| Ilustración 22: Ejemplo Max-Max, Solución.....  | 87  |
| Ilustración 23: Ejemplo Conjuntivo, Umbrales y valoración de alternativas .....                 | 89  |
| Ilustración 24: Ejemplo Conjuntivo, Solución.....   | 89  |
| Ilustración 25: Ejemplo Disyuntivo, Umbrales y valoración de alternativas.....                  | 90  |
| Ilustración 26: Ejemplo Disyuntivo, Solución .....  | 90  |
| Ilustración 27: Ejemplo Lexicográfico, Pesos y Matriz de ordenación de criterios....            | 93  |
| Ilustración 28: Ejemplo Lexicográfico, Solución.....  | 94  |
| Ilustración 29: Suma ponderada, Normalización.....  | 94  |
| Ilustración 30: Suma ponderada, Pesos.....  | 94  |
| Ilustración 31: Ejemplo Suma Ponderada, Normalización y Pesos .....                             | 96  |
| Ilustración 32: Ejemplo Suma Ponderada, Solución.....   | 96  |
| Ilustración 33: Ejemplo Producto Ponderado, Pesos y Pesos ponderados.....                       | 98  |
| Ilustración 34: Ejemplo Producto Ponderado, Solución .....                                      | 98  |
| Ilustración 35: Asignación Lineal .....   | 99  |
| Ilustración 36: Ejemplo Asignación Lineal Media, Jerarquización .....                           | 101 |
| Ilustración 37: Ejemplo Asignación Lineal Media, Solución.....                                  | 102 |
| Ilustración 38: Ejemplo Asignación Lineal Equivalente, Jerarquización.....                      | 103 |
| Ilustración 39: Ejemplo Asignación Lineal Equivalente (II).....                                 | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 40: Ejemplo TOPSIS, Pesos y ponderación de Pesos.....                     | 105 |
| Ilustración 41: Ejemplo TOPSIS, Matriz normalizada y Vectores $V_i^+$ y $V_i^-$ ..... | 106 |
| Ilustración 42:Ejemplo TOPSIS (III).....  | 106 |
| Ilustración 43: AHP, Aproximaciones .....   | 107 |
| Ilustración 44: AHP, Escala de Datos.....   | 107 |
| Ilustración 45:AHP, Ejemplo introducción de datos.....                                | 107 |
| Ilustración 46: Ejemplo AHP, Asignación de valoraciones.....                          | 110 |
| Ilustración 47: Ejemplo AHP, Vector Pesos .....                                       | 111 |
| Ilustración 48: Ejemplo AHP, Vectores Pesos de Criterios y Matriz de Criterios....    | 111 |
| Ilustración 49: Ejemplo AHP, Matriz de Comparación .....                              | 111 |
| Ilustración 50: Ejemplo AHP, Solución .....   | 111 |
| Ilustración 51:Electre I, Normalización .....   | 112 |
| Ilustración 52 Electre I, Umbrales .....  | 112 |
| Ilustración 53: Electre I, Lectura de Matriz.....                                     | 113 |
| Ilustración 54: Ejemplo Electre I, Elección de normalización y Umbrales.....          | 116 |
| Ilustración 55: Ejemplo Electre I, Pesos y Pesos Ponderados .....                     | 116 |
| Ilustración 56: Ejemplo Electre I, Datos normalizados .....                           | 117 |
| Ilustración 57: Ejemplo Electre I, Matriz de Concordancia.....                        | 117 |
| Ilustración 58: Ejemplo Electre I, Índice de Concordancia 43 .....                    | 117 |
| Ilustración 59: Ejemplo Electre I, Selección de Numerador .....                       | 118 |
| Ilustración 60: Ejemplo Electre I, Submatriz de Numerador .....                       | 118 |
| Ilustración 61: Ejemplo Electre I, Cálculo de Denominador .....                       | 118 |
| Ilustración 62: Ejemplo Electre I, Submatriz de Denominador .....                     | 119 |
| Ilustración 63: Ejemplo Electre I, Matriz de Discordancia .....                       | 119 |
| Ilustración 64: Ejemplo Electre I, Matriz de Sobre calificación .....                 | 119 |
| Ilustración 65:Ejemplo Electre I, Alternativas aceptables .....                       | 120 |
| Ilustración 66: Ejemplo Electre I, Casos de empate .....                              | 120 |
| Ilustración 67: Promethee, Filtros .....  | 121 |
| Ilustración 68:Ejemplo Promethee, Pesos y Pesos Ponderados.....                       | 124 |
| Ilustración 69: Ejemplo Promethee, Elección de Filtros .....                          | 124 |
| Ilustración 70: Ejemplo Promethee, Matriz de diferencias .....                        | 125 |
| Ilustración 71: Ejemplo Promethee, Aplicación de filtro.....                          | 125 |
| Ilustración 72: Ejemplo Promethee, Comparación de Alternativas .....                  | 125 |
| Ilustración 73: Ejemplo Promethee, Flujos.....  | 126 |
| Ilustración 74: Promethee I, Solución .....   | 127 |
| Ilustración 75: Promethee II, Ejemplo Solución .....                                  | 128 |
| Ilustración 76: Tipo de criterio.....   | 129 |
| Ilustración 77: Conversión de criterios .....   | 130 |
| Ilustración 78: Introducción de datos .....   | 130 |
| Ilustración 79: Paso de hoja .....  | 130 |
| Ilustración 80: Matriz de decisión .....  | 131 |
| Ilustración 81: Elección de Método.....   | 132 |
| Ilustración 82: Max-Min, Normalización .....  | 133 |
| Ilustración 83: Max-Min, Solución .....   | 133 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 84: Max-Max, Normalización.....                             | 134 |
| Ilustración 85: Max-Max, Solución .....                                 | 134 |
| Ilustración 86:Error en introducción de umbrales .....                  | 135 |
| Ilustración 87: Conjuntivo, Asignación de Umbrales .....                | 135 |
| Ilustración 88: Conjuntivo, Solución.....                               | 135 |
| Ilustración 89: Disyuntivo, Asignación de Umbrales .....                | 136 |
| Ilustración 90: Disyuntivo, Solución .....                              | 136 |
| Ilustración 91: Lexicográfico, Asignación de Pesos .....                | 137 |
| Ilustración 92: Lexicográfico, Solución .....                           | 137 |
| Ilustración 93:Suma Ponderada, Normalización y Pesos.....               | 138 |
| Ilustración 94:Suma ponderada, Solución .....                           | 138 |
| Ilustración 95: Producto Ponderado, Normalización y Pesos.....          | 138 |
| Ilustración 96: Producto Ponderado, Solución .....                      | 139 |
| Ilustración 97: Asignación Lineal, Jerarquización .....                 | 139 |
| Ilustración 98: Asignación Lineal, Solución .....                       | 140 |
| Ilustración 99: TOPSIS, Pesos .....                                     | 141 |
| Ilustración 100: TOPSIS, Vectores apoyo.....                            | 141 |
| Ilustración 101: TOPSIS, Solución.....                                  | 141 |
| Ilustración 102:AHP, Aproximación.....                                  | 142 |
| Ilustración 103:AHP, Introducción de datos.....                         | 142 |
| Ilustración 104: AHP, Leyenda .....                                     | 143 |
| Ilustración 105:AHP, Matriz resumen de criterios .....                  | 143 |
| Ilustración 106: AHP, Matrices intermedias.....                         | 143 |
| Ilustración 107: AHP, Solución .....                                    | 144 |
| Ilustración 108: Electre I, Normalización.....                          | 144 |
| Ilustración 109: Electre I, Pesos.....                                  | 144 |
| Ilustración 110: Electre I, Umbrales.....                               | 145 |
| Ilustración 111: Electre I, Solución .....                              | 146 |
| Ilustración 112: Promethee, Pesos.....                                  | 146 |
| Ilustración 113: Promethee, Filtros I.....                              | 146 |
| Ilustración 114: Promethee, Filtros II.....                             | 147 |
| Ilustración 115: Promethee, Matriz de comparación de alternativas ..... | 147 |
| Ilustración 116: Promethee, Flujos generados .....                      | 147 |
| Ilustración 117: Promethee I, Solución .....                            | 148 |
| Ilustración 118:Promethee II, Solución .....                            | 148 |
| Ilustración 119: Organización del Proyecto .....                        | 150 |
| Ilustración 120: Desarrollo del Proyecto .....                          | 153 |
| Ilustración 121: Diagrama de Gantt.....                                 | 162 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Características de tipologías de decisión.....   | 30  |
| Tabla 2: Escala fundamental de comparación de pares (Saaty, 1980).....                              | 54  |
| Tabla 3: Ejemplo: matriz de comparaciones pareadas .....  | 55  |
| Tabla 4: Valores de consistencia aleatoria en función del tamaño de la matriz.<br>(Saaty,1980)..... | 58  |
| Tabla 5: Límites de consistencia (Elaboración propia) .....   | 58  |
| Tabla 6: Variantes del método Electre .....   | 58  |
| Tabla 7: Clasificación de métodos Electre.....  | 60  |
| Tabla 8: Días efectivos anuales.....  | 154 |
| Tabla 9: Semanas efectivas anuales .....  | 154 |
| Tabla 10: Coste de equipo de profesionales.....   | 154 |
| Tabla 11: Costes de equipo de desarrollo .....  | 155 |
| Tabla 12: Costes de equipo de edición.....  | 156 |
| Tabla 13: Coste Material consumible .....   | 156 |
| Tabla 14: Costes Indirectos .....   | 156 |
| Tabla 15: Horas dedicadas al personal del proyecto.....   | 157 |
| Tabla 16: Costes asociados a la Fase 1 .....  | 158 |
| Tabla 17: Coste asociado a la Fase 2.....   | 158 |
| Tabla 18: Costes asociados a la Fase 3 .....  | 159 |
| Tabla 19: Costes asociados a la Fase 4 .....  | 160 |
| Tabla 20: Costes asociados a la Fase 5 .....  | 160 |
| Tabla 21: Costes totales de cada fase.....  | 161 |



### 1 INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Motivación

Al comienzo de mi último curso en el Grado en Ingeniería en Organización Industrial y del mismo modo que a mis compañeros, se presentó ante mí la incertidumbre sobre el tema que deseaba desarrollar en el Proyecto Fin de Grado. Dada la gran diversidad de opciones, y puesto que en gran medida este trabajo representa los aspectos que más curiosidad han suscitado mi interés durante la formación como Ingeniera en Organización, no suponía una decisión que pudiera ser tomada al azar.

Tras sopesar varias opciones y al comentarle mi situación a mi futuro tutor de Proyecto, Ángel Gento Municio, este me ofreció la oportunidad de realizar un proyecto enfocado a la implementación en Microsoft Excel ® de métodos multiatributo, aprovechando que en esos momentos me encontraba cursando la asignatura Métodos Cuantitativos en Ingeniería en Organización II, la cual podría emplear de trampolín para la realización del mismo.

Ante el atractivo de esta idea, tanto por poder poner en práctica conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación como ingeniera como por el atractivo que presenta la aplicación de métodos teóricos en un entorno conocido como es Microsoft Excel ®, comencé a realizar este Trabajo Fin de Grado.

Del mismo modo, en el momento de reflexionar sobre el enfoque que debía tomar el proyecto, me di cuenta que este debía servir de nexo, tanto para el usuario como para una persona en conocimiento de las metodologías estudiadas, entre el “mundo de las ideas” y el “mundo de las acciones”, o, dicho de otro modo, poder llevar a la práctica, dando solución a problemas de diferentes complejidades, modelos matemáticos, que radican en la simplificación de situaciones reales.

#### 1.2 Objetivos del proyecto

##### 1.2.1 Objetivo principal

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado radica en la realización de la implementación mediante programación en la herramienta Microsoft Excel ® de métodos multiatributo de Ayuda a la Toma de decisión.

##### 1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar un entorno sencillo y robusto en Microsoft Excel ®, que permita la resolución de problemas multicriterio, de hasta 10 alternativas y 15 criterios, mediante los diferentes métodos programados.

## | INTRODUCCIÓN

- Comparar diferentes técnicas para la resolución de problemas multiatributo, mediante el estudio de cada una de ellas y valorando los casos más favorables para la aplicación de cada una de las metodologías.
- Proporcionar al usuario o decisor una herramienta sencilla que le sirva de ayuda para la toma de decisiones frente a problemas multiatributo. El material con el que pueda contar el decisor está formado por una matriz donde introducir los datos del problema, sus correspondientes opciones y un manual, el cual servirá de apoyo ante posibles dudas a la hora de introducir datos o manejar el archivo Microsoft Excel ®.
- Dotar a posibles programadores interesados en la implementación de las metodologías desarrolladas a lo largo del Trabajo Fin de Grado de un manual en el cual se explican y justifican los pasos dados desde la primera fase de la programación hasta la obtención de una solución útil para el decisor.
- Proponer posibles mejoras y mantener un camino abierto para la continuación de la implementación de otros métodos para futuros programadores.

Con lo que puede interpretarse que la realización del presente trabajo nace con la idea de generar una visión clara y sencilla, por medio de una interfaz en Microsoft Excel ®, para resolución de problemas multiatributo mediante diversos métodos multiatributo.

### 1.3 Alcance del proyecto

Este proyecto comprende la realización de la simulación de metodologías para la ayuda a la Toma de Decisión mediante un software conocido como es Microsoft Excel ®. Sin embargo, dado que se trata de un Proyecto Fin de Grado tanto los recursos como el tiempo son limitados, por lo cual antes de comenzar con la realización del mismo, han sido definidos de manera clara y precisa los objetivos principales del mismo, así como el nivel de detalle deseado para cada parte del proyecto.

Por lo que, tras reflexionar sobre magnitud alcanzable con las restricciones propias de un trabajo de estas características, se establecen las siguientes metas a alcanzar.

En primer lugar y como principal finalidad, desarrollar en Microsoft Excel ® una matriz de dimensiones 10 x 15, es decir, una matriz en la cual el usuario pueda introducir problemas de hasta 10 alternativas y 15 criterios, siendo el número de los mismos variable. Esta matriz, se empleará como base, donde se introducirán los datos, para las siguientes hojas del archivo, en las cuales se procederá al desarrollo de los métodos, uno en cada hoja del documento. Del mismo modo, se reservará una

hoja para realizar una normalización generalizada, para todos aquellos criterios que así lo requieran.

La implementación debe ser robusta en todos los métodos, de forma que a la hora de introducir datos o seleccionar opciones dentro del programa, este no dé lugar a averías. Del mismo modo, para ayudar tanto al usuario que quiera plantear un problema multiatributo en el programa, como para el programador que desee consultar el proceso de implementación realizado, se han propuesto sendos manuales que servirán como ayuda.

Por otro lado, con este Trabajo Fin de Grado, personalmente, he tratado de desarrollar y ampliar los conocimientos adquiridos a lo largo de la titulación como Ingeniera en Organización Industrial sobre el software de Microsoft Excel ®.

Como colofón al trabajo y reflejando el atractivo de la temática que el mismo abarca, se pretende abrir camino a la realización de nuevos trabajos o ampliaciones del mismo, mediante la proposición de una serie de ideas, las cuales no han podido ser desarrolladas en este proyecto.

### 1.4 Estructura del tema

El presente proyecto se encuentra dividido en 8 capítulos, en los cuales se desarrollan de manera independiente las aspiraciones comentadas durante la definición de objetivos. Como apoyo a toda la documentación elaborada a lo largo del trabajo, al final del mismo, puede consultarse la bibliografía empleada. Los apartados que componen este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

#### · Capítulo 1: Introducción

A lo largo de este primer capítulo se presenta el tema a desarrollar, justificando la motivación que dio lugar a la realización del mismo, declarando de manera clara y concisa los objetivos a desarrollar y definiendo tanto el alcance que se pretende como la distribución empleada.

#### · Capítulo 2: Introducción a la Toma de Decisión

Este segundo apartado nos ayudará a conocer el ¿por qué?, de los métodos de Toma de Decisión, pues realizaremos un recorrido a lo largo de su historia. Desde la aparición de los precursores de los mismos hasta las últimas innovaciones, propuestas en el Estado del Arte.

También desarrollaremos el procedimiento que abarca a toda metodología multiatributo, describiendo cada fase del mismo.

## | INTRODUCCIÓN

### · Capítulo 3: Fundamentos teóricos de los métodos

En este apartado, se describirán de forma detallada todos aquellos métodos que han sido implementados para la realización del fichero Microsoft Excel ®. A lo largo de este capítulo podemos encontrar metodologías variadas, pero que presentan una característica común, todas ellas estas desarrollas con el fin de resolver problemas multiatributo. Estos procedimientos se presentan desde las más sencillas y que menos información requieren a las más complejas, en las cuales necesitaremos apoyarnos de nuevas definiciones para su aplicación.

### · Capítulo 4, Manual de programador

Este capítulo busca servir de soporte a posibles interesados en la implementación de metodologías de ayuda a la Toma de Decisión, que cuenten con conocimientos básicos sobre la herramienta Microsoft Excel ®.

El manual ha sido desarrollado mediante la explicación de los pasos dados en cada método desde la forma en la cual se propone la inserción de datos por el usuario, hasta la ordenación o filtrado de las alternativas, que servirá de respuesta al usuario.

### · Capítulo 5, Manual de usuario

Con el fin de proporcionar al decisor un refuerzo a la hora de emplear la matriz de decisiones desarrollada en Microsoft Excel ®, en este capítulo puede encontrarse una ayuda a la hora de conocer el formato y requerimientos de los datos a introducir. Así como la manera de desplazarse por el fichero para poder desde que introduce los datos del problema alcanzar la solución del mismo.

### · Capítulo 6, Estudio económico

A lo largo de este apartado se realizará un estudio económico en el que puede verse reflejado el coste total asociado el trabajo, así como el coste específico de cada fase del mismo.

Este estudio económico resulta de especial interés en este tipo de trabajos pues puede ser empleado como indicador del grado de cumplimiento con los objetivos económicos marcados en el arranque del mismo.

### · Capítulo 7, Conclusiones y futuros desarrollos

En el séptimo capítulo se muestra como corolario al trabajo, pues en él se exponen las deducciones finales obtenidas una vez finalizado el presente documento. Del mismo modo, podemos encontrar en este apartado una ventana abierta, dirigida a personas interesadas en el tema, en la cual se proponen mejoras y metodologías que no han podido llegar a ser desarrolladas en este trabajo.

### · Capítulo 8, Bibliografía

Aunque se muestre como capítulo propio, este tiene como finalidad servir de soporte documental a los demás apartados del presente trabajo, pues refleja toda la información adicional empleada para desarrollar y elaborar este proyecto.

## 2 INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

### 2.1 Historia de la toma de decisión

Ya en la antigüedad los primeros seres humanos llevaban a cabo la elección de determinadas funciones básicas, es decir, incurrían en procesos de decisión de carácter biológico de los cuales dependía su existencia. A medida que estos individuos iban evolucionando, sus decisiones adquirían mayor grado de complejidad, con lo que aparecen las primeras tomas de decisiones culturales, las cuales se caracterizarán por su carácter hereditario, ya que, por ejemplo, promovían la facilitación de herramientas, alimentos o prendas de abrigo. (Gross, 2010)

Puesto que las decisiones adquirían mayor grado de complejidad, a medida que la vida de los humanos primigenios se desarrollaba, resulta necesaria la aparición del especialista en la toma de decisiones. Este experto, generalmente representado por la figura de sacerdotes y reyes, se encargaba de la toma de decisiones donde el grupo de implicados era el mismo que el de convivencia. Es en este momento, y bajo el poder de esta nueva figura, cuando se produce la aparición de modelos que consistían en basar las decisiones en designios divinos, con lo que aparecen los modelos mágicos y demoniacos, mediante los cuales se tomaban decisiones bélicas. (Gross, 2010)

Sin embargo, es en la antigua Grecia (s.V a.C) cuando aparece por primera vez la toma de decisiones racionales como concepto. A partir de ese momento se introducen el empleo del racionamiento y la lógica, de la mano de conocidos filósofos, en la toma de decisión. Algunos como Aristóteles y Platón, declaran que esta capacidad de decisión sobre situaciones de toda índole es lo que nos permite diferenciar a los seres humanos de los animales. (Gross, 2010)

Más adelante, en la Edad Media, y dada la relevancia que en esta etapa cobran la magia y las creencias religiosas, el proceso de toma de decisión queda relegado a un segundo plano. Esto se mantendrá hasta el Renacimiento, pues es aquí donde aparece la idea de toma de decisiones científicas, tal y como es conocida hoy en día. Ante este hecho podemos afirmar que la toma de decisiones forma parte de la vertiente contemporánea, pero que sus precursores aparecen a lo largo de toda la historia del ser humano. (Gross, 2010)

Si nos centramos en la aparición formal de los primeros problemas científicos de toma de decisión, encontramos que el primer problema de decisión multicriterio conocido fue propuesto por J.Priestley (1733-1804), químico de origen inglés, a B.Frankling (1706-1790). Este problema se enmarcaba dentro de la categoría de los conocidos como métodos multiatributo discretos compensatorios. J.Priestley recibió contestación en 1772, mediante una carta en la que B.Frankling desarrolla una

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

metodología que el mismo enunció como “ Algebra moral o prudencial”. El proceso estaba basado en la asignación de pesos subjetivos a los atributos mediante los cuales se valora la mejor alternativa. La principal característica de este método se halla en la pluralidad alcanzada en base a diversos puntos de vista, es decir, permitía tener en cuenta opiniones y preferencias dentro de la toma de decisión. (Fernández Barberis y Escribano Ródenas)

Las primeras aportaciones formales sobre métodos de toma de decisión se engloban en problemas en que los procesos de decisión incurren en votaciones en ámbitos sociales, pertenecientes a áreas políticas y matemáticas. Pues se trata de conocer las reglas mediante las cuales los votantes expresan sus deseos y como de esta forma pretenden materializar la meta o fin último. Destacamos, por su popularidad, la elección social, sin embargo, de igual forma comienza la aplicación de estas metodologías a la resolución de problemas complejos. En este caso, las figuras más importantes, serán: Ramón LLull, Nicolas Cusanos, el Marqués de Caritat de Condorcet y el Caballero Jean-Charles de Borda. A continuación, comentaremos brevemente las aportaciones realizadas por cada uno al ámbito de la Toma de Decisión.

La idea de comparación binaria para resolver el problema de agregación de preferencias individuales nace de la mano de Ramón LLull (1232-1316). Esta comparación se basa en entrelazar valores de pares de alternativas estableciendo relaciones entre ellos. (Fernández Barberis y Escribano Ródenas)

Nicolas Cusanus (1401-1464), promovió el método de puntuaciones o Scoring method, mediante el cual se halla repuesta al problema de agregaciones individuales. También introdujo el cálculo unitario que consigue derivar la función de utilidad total en la sociedad desde los intereses personales de un grupo de interesados, gracias a la inspiración de Bentham. (Fernández Barberis y Escribano Ródenas)

Como aclaración, la función de utilidad valora mediante una expresión matemática, la relación existente entre pares de variables, como pueden ser la cantidad de servicios o los bienes consumidos por un individuo y el grado de satisfacción alcanzado por el consumidor. A lo largo de la historia se ha observado que con el fin de describir el comportamiento del consumidor de manera racional resulta esencial evaluar sus preferencias, recordando en todo momento que estas radican en elecciones subjetivas e individuales. La función de preferencia supuso de gran ayuda para conocer estas preferencias.

Tratando de esclarecer la problemática encontrada sobre la culpabilidad de un individuo ante un tribunal, en torno a 1780, Marie Antonie Nicolas de Caritat, Marqués de Condorcet (1743-1794) propone una metodología de consenso que presenta gran similitud con las valoraciones multicriterio, en su obra “*Essai sur*

*l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*" (Condorcet 1785). De esta forma pretendía realizar una reflexión científica aplicada al mundo de las ciencias humanas.

El Marqués de Condorcet junto con el Caballero Jean-Charles de Borda (1733-1799) son considerados los creadores de los sistemas de votación. Sin embargo, los proyectos presentados por Borda a lo largo de los años 1784 y 1785 en la Academia de las Ciencias sobre los sistemas de valoración pusieron en jaque las memorias de Condorcet. Tras arduas deliberaciones, la Academia de las Ciencias eligió el método propuesto por Borda, dado que este resultaba más sencillo.

Es en los últimos años del siglo XIX y a comienzos del siglo XX cuando, por medio de la creación de la economía, alcanzan gran impulso las metodologías orientadas a la resolución de problemas multiatributo. Desde este momento, los aspectos prácticos del análisis de decisión multiatributo se desarrollan en gran medida en torno a teorías económicas. Un ejemplo de ello es la teoría de la utilidad antes comentada.

La teoría de la utilidad abarca el análisis del comportamiento de los agentes económicos, según las necesidades a satisfacer. Conocido como el economista utilitario, Francis Ysidro Edgeworth (1845-1926) orientó sus estudios en busca de la maximización de la utilidad de los diversos agentes competidores en la economía. Para ello propuso la creación en cada agente implicado, de las curvas de la indiferencia o líneas de igualdad de utilidad, desde las que posteriormente se obtiene el conjunto óptimo de Pareto por derivación.

Otra de las vertientes que se apoya en las metodologías multiatributo es la conocida como teoría del bienestar, rama del pensamiento económico que propone aumentar el bienestar social, por medio de la maximización de la eficiencia económica, pero manteniendo la cantidad de recursos disponibles. También encuentra su base en el diagrama de Pareto.

Si continuamos hablando de Pareto, más bien de su autor, Vilfredo Federico Dámaso Pareto (1848-1923), debemos comentar la aportación realizada por este a las metodologías multiatributo, para las cuales proporcionó la definición de optimalidad, pasando así a instituirse como la base de los problemas de decisión. Entendemos por optimalidad de Pareto aquella situación en la cual no es posible beneficiar a un agente sin perjudicar a otro. (Barba-Romero y Pomerol, 1997)

Desde la aportación realizada por Pareto, resulta más sencilla la comprensión del concepto de dominancia, que más adelante explicaremos, mediante el cual la elección de la solución al problema planteado puede no ser la más óptima, pero si representará la que mejor se ajuste a la satisfacción de los criterios elegidos por el decisor.

El siguiente hito reseñable en la historia de la Toma de Decisión se produce en los años 20, con la aparición de la Teoría de Juegos. Este área del Análisis de Decisión Multicriterio emplea la matemática aplicada sobre modelos de estudio de interacciones en estructuras formalizadas de incentivos, o juegos, sobre los que se realiza la toma de decisión. Por medio de estas metodologías podemos conocer las estrategias óptimas, el comportamiento previsto y observado de los jugadores. La Teoría de Juegos está orientada a la resolución de problemas en los cuales el comportamiento de un individuo depende de las acciones llevadas a cabo por el resto de jugadores.

Las primeras publicaciones de la escuela americana datan de la década de los cincuenta, y dentro de sus principales autores podemos destacar a Tjalling Koopmans, Harold William Kuhn, Albert William Tucker y K.J. Arrow. Del mismo modo que hicimos anteriormente, a continuación, relataremos las principales aportaciones de estos a la metodología de la Toma de Decisión. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

En primer lugar, Tjalling Koopmans (1910-1985), que propuso el concepto de vector eficiente en 1951 reemplazando al óptimo desarrollado por Pareto, en su artículo "*Analysis of production as an efficient combination of activities*". En su propuesta define un vector input-output que será eficiente únicamente, en el caso de que se cumplan las siguientes condiciones:

- Fijando los inputs, el aumento de un output solo es posible con la disminución de algún otro output. (Eficiencia con orientación output).
- Fijando los outputs, el aumento de un input solo es posible con la disminución de algún otro input. (Eficiencia con orientación input).

Otra nueva vertiente que aborda el problema de toma de decisión multicriterio es la basada en el empleo de programación lineal. Está fue desarrollada por Harold William Kuhn (1925) y Albert William Tucker, mediante el concepto de vector máximo, que permitió a la optimización multiatributo convertirse en una disciplina propia. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

En 1951, K.J. Arrow formula el Teorema de Imposibilidad, desde el cual se refiere a la imposibilidad lógica de establecer funciones de bienestar social (o utilidad colectiva) desde el establecimiento de preferencias de utilidad personales propias de cada decisor. Para ello establece que cada elección personal se basa en 5 axiomas, explicados a continuación:

1. Universalidad: sean cual sean las ordenaciones adoptadas por los criterios, la función de elección social es capaz de funcionar.

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

2. Unanimidad o de Pareto: cuando hay unanimidad sobre una elección, la sociedad ratifica esa elección.
3. Independencia respecto a las alternativas irrelevantes: la elección entre dos opciones a y b, solo depende de la opinión sobre estas dos y no de opiniones sobre otras opciones.
4. Transitividad: la relación social de preferencia es transitiva. Este axioma somete a la sociedad a las mismas exigencias de racionalidad que a sus miembros.
5. Totalidad: la relación entre dos opciones es total, es decir, establece:  $a > b$  o  $b > a$  o  $a = b$ .

Únicamente en los procesos dictatoriales se pueden cumplir estos 5 axiomas. Es decir, el dictador escoge lo que debe hacer toda la población. Sin embargo, esta teoría ha provocado numerosas disputas en sociedades democráticas. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

La primera consideración de los conceptos básicos del Análisis de Decisión Multiatributo como tal, se producen en la década de los sesenta. A partir de este momento, se individualiza dicha metodología, dotándola de su propia terminología y tomando importancia real. Gracias a este hecho, aparecen diversos modelos que hoy son considerados clásicos, como son: la Programación por Metas o Goal Programming (1961), el Método Interactivo STEP (1969) o el Método Electre (1968), este último será el único estudiado a lo largo del presente Trabajo Fin de Grado.

Aunque en la década de los sesenta aparece la metodología de Toma de Decisión Multiatributo como tal, no es hasta diez años más tarde, en la década de los setenta, cuando comienzan a realizarse las primeras conferencias sobre el Análisis de decisión multicriterio, en las cuales se presentan los trabajos e investigaciones realizadas en la pasada década, con el fin de extraer las primeras conclusiones sobre el mismo.

La primera reunión científica dedicada explícitamente a la metodología multiatributo, tuvo lugar durante la celebración del VIII Congreso de Programación Matemática, en el La Haya en 1970. En esta convención resultaron como triunfadoras las propuestas llevadas a cabo por Bernard Roy, así como los métodos multicriterio interactivos desarrollados por Benayoun, Tergny y Geoffrion. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

En 1972 en la Universidad de Columbia, Cochrane y Zeleny organizaron la “*First International Conference on Multiple Criteria Decision Making*”, una nueva convención sobre las metodologías de Toma de Decisión Multiatributo. A esta asistieron en torno a 200 delegados y fueron presentados más de 70 trabajos sobre

este ámbito. Los ponentes fueron variados, pues se reunieron desde incipientes figuras que presentaban sus tesis doctorales, entre los que se encontraban Dyer, Ignizio, Ijiri, Keeney, Yu y Zeleny; hasta consagrados científicos como Churchman, Evans, Fishburn, Roy y Zadeh. Gracias a este congreso, los estudios sobre la problemática de métodos multiatributo se constituyeron como ciencia expresamente, hecho que queda expuesto mediante la publicación de las actas del congreso en 1973, por Cochrane y Zeleny. Es durante esta serie de conferencias cuando se acuerda la formación del “Special Interest Group on Multiple Criteria Decision Making”. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

A lo largo de esta década, se produce la proliferación de publicaciones entorno a las metodologías de toma de decisión multiatributo, entre las que podemos destacar:

- 1976-1977, Bernard Roy plantea y define la necesidad de Desoptimizar la Investigación Operativa. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

- 1977, Keen introduce el concepto de “hombre aprehensivo”. Entendiendo tal concepto como aquel hombre que siente gran preocupación por el futuro, propone una visión global ante la realidad, reconoce las oportunidades, confía en su experiencia, es reactivo frente a lo incierto y trata de buscar una solución satisfactoria y no óptima. (Fernández Barberis y Escribano Ródenas).

- En 1975 se produce la división dentro del paradigma multicriterio ante la aparición de diversas líneas de investigación. A partir de este año diferenciaremos:

- La escuela francófona formada por, entre otros, Brans, Jacques-Lagrèze, Roy, Rubens, Vansnick o Vincke. Estos científicos emprenden sus estudios en el ámbito de la investigación del multicriterio discreto, las relaciones de superación y las preferencias del decisor.

- La escuela americana, dividida en dos tendencias. Por un lado, la vertiente de la utilidad aditiva, compuesta por Keeney y Raiffa, y la pragmática, basada en un amplio abanico de métodos, dentro de la cual podemos encontrar a Saaty, Yoon, Zeleny o Zionts.

- Por último, la escuela europea, en la cual destacamos a Rietveld, Paelink y Wallenius; desde la cual se promueven metodologías basadas en alternativas o criterios.

También en 1975, se funda la organización “The European Working Group on Multicriteria Decision Aid”, que acuerda reunirse semestralmente para poner en común nuevas ideas. (Fernández Barberis y Escribano Ródenas)

· El Método de la Utilidad Multiatributo (MAUT) es propuesto en 1976, y en el Keeny y Raïfa abordan el tema de las preferencias. Mediante esta sistemática, tratan de transformar la información aportada por el decisor en una solución en la cual todos los criterios definidos sean tenidos en cuenta. Podemos encontrar antecedentes de esta idea en documentos de Leontief (1947), Debreu (1960) y Fishburn (1965 y 1970). (Barba-Romero y Pomerol, 1997).

· A finales de la década de los setenta, en 1979, se constituye, manteniéndose hoy en día vigente, la “International Society on Multiple Criteria Decision Making” al frente de la cual se encontraba Stanley Zionts. Esta organización sustituyó a la “Special Interest Group on Multiple Criteria Decision Making”. En la actualidad más de 1700 científicos de 97 nacionalidades forman parte de esta asociación. Los encuentros se realizan bianualmente, cada uno en una ciudad del mundo, la próxima tendrá lugar en Ottawa (Canadá) en Julio de 2017.

A largo de la década de los 80, gracias a la incorporación de la informática en las metodologías multiatributo, podemos reseñar dos grandes hechos en esta área:

· Se crea la escuela del Pacífico, formada por figuras como Takeda, Seo, Sawaragi, Tabucanon y Chankong.

· En 1980, Thomas L. Saaty desarrolla el método, AHP (Analytic Hiererchy Process), que más tarde comentaremos.

Ya en 1984, nace el Método Promethee (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) de la mano de Brans, que también estudiaremos en el próximo capítulo. (Barba-Romero y Pomerol 1997)

Resulta clave a lo largo de los siguientes años la introducción de la informática como método de ayuda al desarrollo e implementación de las metodologías de toma de decisión multiatributo. Pues de esta forma pueden desarrollarse modelos interactivos en base a las propuestas realizadas en la década de los setenta, así como de las nuevas metodologías desarrolladas.

### 2.2 Estado del arte

Tiempo atrás las limitaciones en la implementación de las teorías matemáticas realizadas en el área de la Toma de Decisión suponían una barrera para el desarrollo de estas metodologías, pues no se podía disponer de herramientas para el estudio de las mismas o su coste era excesivamente elevado. Sin embargo, gracias a la informática y promovidos por la creciente necesidad de elevar la eficiencia en las organizaciones y optimizar sus recursos con el fin de satisfacer al cliente, cada vez más preparado y exigente, ha sido llevada a cabo una revolución en cuanto al

paradigma decisional multiatributo. Esta necesidad de cambio radica en la nueva visión de la Toma de Decisión Multiatributo, pues ahora se deja a un lado el enfoque de la optimización para abordar las sistemáticas multicriterio, por las cuales se pueden llegar a obtener modelos racionales sobre la forma de actuar del decisor o usuario. Mediante estos modelos no tratamos de obtener herramientas de ahorro en cualquier unidad de la corporación, sino trataremos de hallar soluciones que permitan la reducción de costes totales y una mejora del servicio, que pueda ser percibida por el cliente, es decir, mediante la implementación de estas técnicas las empresas estudian “lo que desea el cliente”, para aumentar la calidad de sus prestaciones, aspecto que anteriormente no se había tenido en cuenta.

En la actualidad existen multitud de métodos desarrollados entorno a la toma de decisión multatributo, por ello resulta necesario realizar una clasificación de los mismos. En este caso hemos optado por basarnos en la información que tiene disponible el decisor, pues como hemos comentado ahora juega un papel clave, y además nos resultará una forma cómoda de implantar los métodos estudiados a lo largo del presente trabajo en Microsoft Excel ®. Esta ordenación fue desarrollada por Chen y Hwang en 1992, y en ella podemos distinguir entre información ordinal, cardinal o estandarizada, según se muestra a continuación (Ilustración 1).

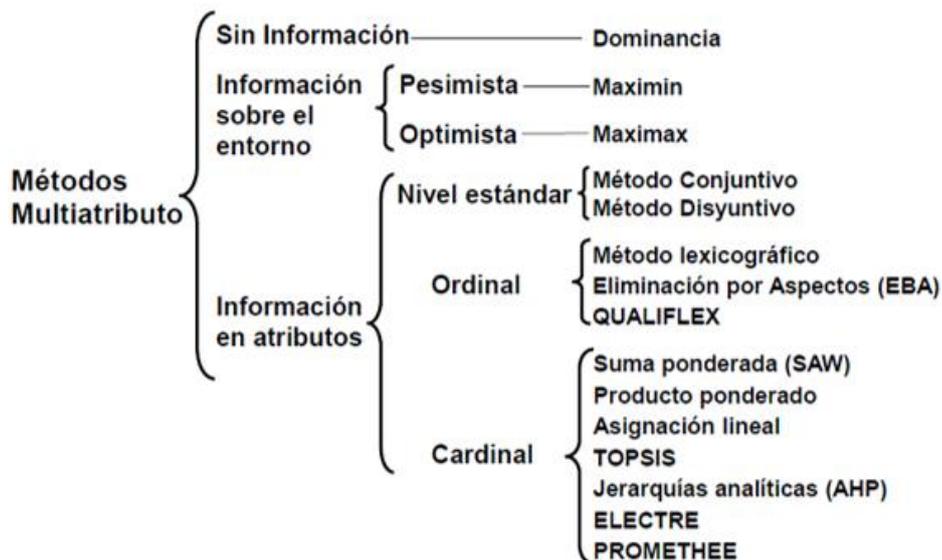


Ilustración 1: Ordenación Métodos Multiatributo (Chen & Hwang, 1992)

## 2.3 ¿Qué entendemos por decisión?

### 2.3.1 Definición

Keeny definía, en 1982, la toma de decisiones como “una formalización del sentido común para aquellos problemas demasiado complejos en que este no puede ser utilizado de modo informal”. Es decir, podemos definir decisión como la elección

entre varias alternativas posibles, teniendo en cuenta la limitación de recursos y las necesidades del agente que nos plantea el problema.

Puesto que debemos tomar una decisión seleccionando la alternativa que mejor cumpla con los requisitos evaluados, necesitaremos información sobre cada una de las alternativas y sus consecuencias en el problema. Por ello entendemos que esta información representará la materia prima o input del modelo, que una vez sometida al proceso de implementación de una metodología concreta, nos proporcionará como output la acción a ejecutar o alternativa que mejor resuelve la problemática. Si analizamos los resultados obtenidos con la opción elegida y los integramos con la información ya evaluada, tendremos la base de una nueva decisión a implementar, pudiendo establecer así un proceso continuo de mejora o retroalimentación.

### 2.3.2 Tipologías

Como sabemos, los métodos de ayuda a la toma de decisión no buscan la solución óptima de un problema, pues en la realidad es común que no exista una alternativa ideal. Por ello trataremos de buscar, según los dos grandes grupos de metodologías, la solución que mejor respuesta proporcione al problema planteado. (White, 1990)

- Toma de decisión multiatributo (MADM). Enfocada a problemas en los cuales el número de alternativas se encuentra fijado, con lo cual el decisor únicamente debe seleccionar, clasificar u ordenar las diferentes alternativas. En esta categoría podemos encontrar los métodos con solución a priori y los métodos interactivos.

Dentro de las dos variantes posibles de los métodos multiatributo los más empleados son los de solución a priori, en los cuales los decisores deben proporcionar la información antes de comenzar la implementación del método. La ordenación en este caso es la comentada en la Ilustración I.

- Toma de decisión multiobjeto (MODM). En esta variante de los procesos de toma de decisión las alternativas no están definidas al inicio del proceso, con lo que el decisor busca obtener o diseñar la “mejor” alternativa dentro de las limitaciones con los recursos disponibles.

Estaremos ante un problema multiobjeto en el caso de que se presenten infinitas soluciones alternativas, es decir tendremos un problema continuo de naturaleza infinita, que será resuelto por medio de métodos de optimización para encontrar un conjunto de soluciones eficientes, no dominadas u óptimas.

Hemos realizado la clasificación de las metodologías multiatributo en base a la naturaleza y contenido que tratamos de resolver, a continuación, podemos ver una tabla resumen con las principales características de cada una de las modalidades.

| ASPECTO               | MADM                       | MODM                 |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| Criterio definido por | Atributos                  | Objetivos            |
| Objetivos             | Implícitos                 | Explícitos           |
| Atributos             | Explícitos                 | Implícitos           |
| Restricciones         | Inactivas                  | Activas              |
| Alternativas          | Número definido (discreto) | Infinitas (continuo) |
| Usos                  | Selección                  | Diseño               |

*Tabla 1: Características de tipologías de decisión*

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado nos centraremos en las metodologías multiatributo, dejando a un lado los procesos multiobjeto.

### 2.3.3 Agentes en el proceso de decisión

Antes de pasar a desarrollar las fases del proceso de toma de decisión debemos evaluar a los agentes humanos implicados. Si nos encontramos en una situación que implique conflictos de poder, deberemos establecer los actores principales. De esta forma identificaremos que será un actor del proceso, aquel individuo o grupo de individuos, que si por su sistema de valores, bien sea en primer grado por las intenciones del mismo, o de segundo, por la manera en la que hace invertir las de otros individuos, influencia directa o indirectamente a la decisión (Roy, 1985). De esta forma establecemos los tres agentes principales, en un problema de toma de decisión, de la siguiente forma:

- Decisor, individuo o grupo de individuos que como indica su nombre, tiene como función tomar la decisión, es decir, a la vista de las observaciones recibidas deberá seleccionar la alternativa final que será implementada para la resolución del problema.
- Analista, cuando existe, realiza la función de apoyo al Decisor aconsejándole por medio del estudio pormenorizado de la formulación y el problema plantado.
- Público o stakeholders, grupo social que sin participar activamente en el proceso de toma de decisión recibirá los impactos, ya sean positivos, negativos o neutros de la alternativa elegida como solución al problema plantado.

## 2.4 Proceso de toma de decisión

La problemática relacionada con la toma de decisiones ha sido abordada a lo largo de la historia con una perspectiva monoatributo, sin embargo, este planeamiento ha

ido perdiendo protagonismo frente a la metodología multiatributo, por las ventajas que este último presenta.

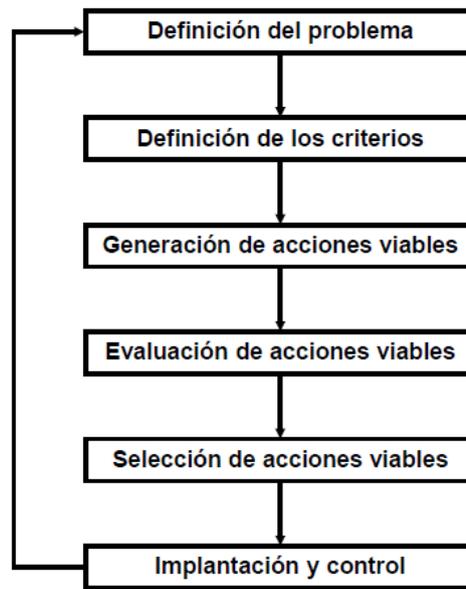
El proceso de toma de decisiones puede dividirse en una secuencia de etapas, o fases, discretas, que se caracterizan por la búsqueda de un fin analítico parcial en cada una de ellas.

A lo largo de este apartado se ha propuesto dicho método dividido en seis fases, mediante las cuales se implementará un problema sin previa definición hasta alcanzar la selección e implantación de la solución tomada por el decisor con ayuda de los métodos multiatributo planteados. Por lo que teniendo en cuenta las limitaciones presentes en la formulación monoatributo, como son la reducida y no natural visión de la problemática planteada y la limitación frente a restricciones, siendo estas fijas e inquebrantables, se establece necesario la implantación de una metodología en la cual se tuviera en cuenta mayor abanico de criterios y pudieran establecerse restricciones menos estrictas con el fin de obtener un proceso de ayuda a la toma de decisión más natural y flexible.

Para poder aplicar metodologías multiatributo debemos contar con un problema formado por al menos dos criterios de decisión o atributos, pudiendo estos estar enfrentados, y al menos dos alternativas que puedan ser valoradas por los atributos impuestos. A continuación, definimos de forma clara los conceptos implicados en este proceso, definida según Masud y Ravi en 2008.

- Alternativas: posibles soluciones al problema de decisión, entre las cuales el decisor puede elegir.
- Atributos o Criterios: características, rasgos, cualidades, o parámetros que describen cada una de las alternativas. El número de atributos que describe las alternativas será elegido por el decisor o grupo de decisión. Estos pueden ser valorados de dos formas: cuantitativamente, si tenemos evaluaciones numéricas y cualitativamente, sino existe unidad de medida, siendo la medida subjetiva.
- Pesos: parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor entre atributos.
- Objetivo o Meta: delimita el deseo que se quiere satisfacer, indicando las direcciones de mejora según las preferencias del conjunto decisor. La alternativa resultante del proceso cumplirá los atributos establecidos, estableciéndose al máximo el fin último para el cual ha sido formulado el problema.

El proceso de toma de decisión presentado en este Trabajo Fin de Grado sigue el siguiente esquema (Ilustración 2) , caracterizado por ser un proceso cíclico y de aprendizaje continuo.



*Ilustración 2: Proceso de Toma de Decisión (Robbins, 1994)*

A continuación, se comenta cada una de estas fases:

#### 2.4.1 Definición del problema

El punto de partida para alcanzar la solución de un problema pasa por identificarlo adecuadamente. Para ello debemos aclarar el concepto de problema en el caso de la toma de decisión, entenderemos por tal, la discrepancia entre un estado actual de un escenario concreto y el estado al cual deseamos llegar.

Ahora bien, antes de emprender un proceso de toma de decisión, debe reunirse el decisor o usuario junto con el analista para discernir las discrepancias, estudiando los recursos necesarios y las acciones a tomar. De esta forma, ambos serán conscientes de la problemática de la situación actual, y podremos avanzar, de manera racional, en la secuencia de decisiones.

#### 2.4.2 Definición de los criterios

En este paso señalaremos las pautas o los juicios que resultarán clave para alcanzar la solución al problema planteado en el paso anterior. Dentro de este abanico de criterios planteados para llegar hasta la meta es necesario conocer cuales han de ser tenidos en cuenta y cuales podrán ser omitidos, por resultar irrelevantes a la hora de tomar la decisión final.

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

El conjunto de criterios que nos permita realizar el análisis del problema para plantearle una solución al decisor deber tener las siguientes propiedades:

- Compleitud: cuando un problema o planteamiento se encuentra completamente representado o descrito en todos los aspectos y posibilidades gracias a los atributos que el decisor ha seccionado.
- Operatividad: el decisor debe ser capaz de entender las implicaciones de las alternativas y que estos criterios resulten útiles para ayudar al decisor a encontrar la mejor alternativa.
- Descomponibilidad: los criterios deben atender a un apartado diferente del problema global de forma independiente.
- No redundancia: los criterios no deben representar las mismas características, con el fin de no ocasionar problemas de duplicidad en el método.
- Minimalidad: de este modo podemos limitar al mínimo el número de criterios a emplear para lograr la descripción de un problema. Deberemos excluir aquellos criterios que no aporten ninguna información al sistema.

Por otro lado, en el caso que a posteriori el método de toma de decisión requiera de una ordenación de los criterios elegidos, en este paso procederemos a la asignación de ponderaciones para los mismos. Gracias a los pesos otorgados a cada atributo lograremos priorizar de forma correcta los criterios más relevantes de nuestra problemática, dado que no todos no representarán la misma importancia en la toma de decisión final. Una forma de realizar este ranking de prioridad puede ser dotar de mayor valor al criterio preferente y ponderar los demás en relación con este.

### 2.4.3 Generación de acciones viables

Ahora el analista y el decisor reunidos deben ser capaces de obtener y presentar todas las alternativas factibles, es decir, que cumplan los criterios planteados en las fases anteriores y que puedan resolver el problema con éxito.

### 2.4.4 Evaluación de acciones viables

Las alternativas propuestas deben ser estudiadas minuciosamente, analizando las fortalezas y debilidades de forma clara para cada uno de los criterios seleccionados en las fases anteriores.

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

Si profundizamos en este paso, debemos ser conscientes de que seleccionar buenas alternativas en la gran mayoría de los casos es difícil, pues el razonamiento humano trata de abordar nuevas problemáticas según el proceso asociativo (Dawes, 1988). El proceso asociativo proporciona resultados eficientes y eficaces ante entornos con mínima incertidumbre, sin embargo, ante una situación desconocida, en la cual no tenemos experiencia previa, este pensamiento puede incurrir en asociaciones que no tengan en cuenta otras que conduzcan a mejores resultados. Las técnicas basadas en pensamiento asociativo más conocidas son: la tormenta de ideas (Osborn, 1957), los mapas cognitivos (Eden, 1988) o los mapas de diálogo (Conklin, 2006).

Ahora bien, si disponemos de gran variedad de alternativas, deberemos organizar la información y definir un modo de reducción de las mismas (Kirkwood, 1997). Por otro lado, podemos contar con un número demasiado reducido, por lo que necesitaremos alternativas adicionales a las ya existentes. Para ampliar el rango de estas, deberemos recurrir a la creatividad o a procesos para su desarrollo y generación.

El conjunto final de alternativas especificadas quedará definido como  $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ , donde  $m$  es conocida y se cumplen las siguientes características:

- Sin repeticiones, cada alternativa debe ser sustancialmente diferenciable del resto del conjunto  $A$  definido.
- Excluyente, las alternativas del conjunto  $A$  no pueden combinarse en la elección final.
- Exhaustivo, el conjunto de alternativas  $A$ , representa el universo de todas las posibles soluciones al problema planteado.

Cada alternativa  $A_i$  será evaluada sobre los criterios establecidos, definiendo en ellos el nivel en el cual dan respuesta a ese atributo.

### 2.4.5 Selección de acciones viables

En el momento en el cual las alternativas han sido establecidas, presentadas y evaluadas por el decisor que ha de tomar la decisión en según los criterios establecidos y jerarquizados, pasamos a elegir una única alternativa como solución al problema. Esta alternativa supondrá el alcance de la meta del problema planteado, y representará la mejor de las propuestas planteadas según los criterios y el método multiatributo seleccionado para el procedimiento establecido.

### 2.4.6 Implantación y control

Aunque el proceso de elección referente a las alternativas ha sido completado en la fase anterior, la decisión debe llevarse a cabo con el fin de obtener el resultado esperado por el decisor.

En este paso, y manteniendo como objetivo que la alternativa seleccionada sea instaurada de forma correcta, debe exponerse ante las personas afectadas y lograr que se comprometan con la misma, pues si estas participan en el proceso de forma activa resultará más fácil que se logre el objetivo deseado. Del mismo modo, resulta indispensable contar con una planificación, organización y dirección efectivas para alcanzar tal meta.

Para poner fin al proceso completo y una vez se ha realizado la implantación de la alternativa mejor valorada a lo largo del mismo, está debe ser evaluada. Mediante la evaluación de la solución adoptada comprobaremos si hemos logrado corregir el problema plantado. Si como resultado tenemos que el problema persiste, deberemos estudiar en que momento del problema nos desviamos del enfoque deseado, y afrontar una nueva decisión sobre la decisión inicial: desestimar el problema planteado por completo, comenzando de nuevo el proceso; o retomar la fase a partir de la cual nos obtuvimos el resultado esperado.

## 2.5 Normalización

Antes de comenzar con la aplicación de los métodos de toma de decisión que se han implementado en este trabajo, en algunos casos, debemos realizar la normalización de los datos introducidos por el decisor.

Para problemas cuyo objetivo es la toma de decisión, es necesario disponer de una herramienta que permita transformar los valores de los diferentes criterios en unidades homogéneas con el objetivo de convertirlos en valores comparables y operables aritméticamente entre sí. Es decir, la normalización consiste en descomponer los datos aportados para los diferentes criterios en otros equivalentes de manera que puedan verificarse las reglas de normalización. La normalización de nuestra matriz presentará las siguientes ventajas:

- Permite la selección de la alternativa más adecuada, pues dado que los criterios se expresan en diferentes magnitudes se ve complicada esta elección si no se incurre en este proceso.

- Al emplear una escala fija y acotada podremos definir niveles de referencia que faciliten la toma de decisión, así la comparación de alternativas es inmediata.

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

El proceso de normalización puede realizarse según tres modalidades:

- Sin cambio de magnitud, como por ejemplo el caso de mediciones de temperaturas realizadas en diversas escalas termométricas y posteriormente representadas en una común.
- Con cambio de magnitud a escala libre, estaríamos ante este caso si realizamos la transformación de datos de producción expresados en toneladas a una escala de valores de mercado, como son euros.
- Con cambio de magnitud a escala fija, si transformamos, por ejemplo, datos de consumo de energía eléctrica en una escala adimensional acotada entre unos valores fijos.

En la inmensa mayoría de los problemas de toma de decisión multiatributo la vertiente usada para la homogeneización de sus valores es la correspondiente con la última de las enunciadas.

Existen diversas técnicas estadísticas para realizar la normalización de datos, pero a lo largo del presente Trabajo Fin de Grado nos centraremos en las cuatro definidas a continuación.

### 2.5.1 Según % del máximo

Con este procedimiento obtendremos una normalización lineal pura. Para la aplicación del mismo, debemos realizar la división de cada valoración de las alternativas para un atributo entre el valor de la alternativa mejor puntuada para ese criterio.

Si lo expresamos matemáticamente tendremos para cada valor normalizado lo siguiente:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\text{Max } x_{ij}}$$

Los valores homogeneizados para este tipo se encontrarán dentro del intervalo [0,1] conservando la proporcionalidad, y observaremos cierta tendencia a la concentración de valores.

### 2.5.2 Según % del total

Al igual que para el método anterior, este caso se corresponde con una linealización pura.

La forma de normalizar los datos, se realiza mediante la división de cada valoración para las alternativas de estudio, entre la suma de todas las valoraciones de un criterio, es decir:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}}$$

Los datos conservarán la proporcionalidad dentro del intervalo [0,1], y aumenta la tendencia a la concentración de valores respecto al caso anterior.

### 2.5.3 Según % del rango

A diferencia que el primer y segundo método, en este se producirá la normalización mediante una linealización con ordenada en el origen.

Ahora debemos realizar fracción entre la diferencia de la valoración de cada alternativa para un criterio menos el valor mínimo alcanzado por las valoraciones en ese criterio, entre la máxima diferencia entre todas las estimaciones dadas. Matemáticamente se muestra:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min } x_{ij}}{\text{Max } x_{ij} - \text{Min } x_{ij}}$$

La normalización en este caso no conserva la proporcionalidad, pues los datos se adaptan a la concentración media de los valores. Los datos se siguen manteniendo en el intervalo [0,1].

### 2.5.4 Según Vector Unitario

El último de los posibles tipos de normalización desarrollados en el presente Trabajo Fin de Grado, realiza la homogeneización mediante una linealización pura.

Este se aplica dividiendo cada dato de la matriz entre el módulo generado por todas las valoraciones dadas para un criterio. El módulo de dicho vector se calcula mediante la raíz de la suma de los cuadrados de cada término. Si lo expresamos matemáticamente tenemos:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}}$$

## | INTRODUCCIÓN A LA TOMA DE DECISIÓN

Como los anteriores, los valores obtenidos se encuentran en un rango  $[0,1]$  y conservan la proporcionalidad, aunque también muestran alta tendencia a la concentración de valores.

Una vez los datos del problema han sido normalizados, para los problemas que esto sea necesario, podemos comenzar con la aplicación de los métodos sobre los que trata este Trabajo Fin de Grado.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

En este capítulo se irán explicando de forma muy detallada cada uno de los métodos para la toma de decisión sobre los que se ha realizado la programación en Microsoft Excel ®. Sin embargo, para algunos de los métodos desarrollados a lo largo del presente Trabajo Fin de Grado previamente a su realización será necesario normalizar las valoraciones atribuidas a los criterios para cada alternativa, esto se desarrolla a continuación.

#### 3.1 Método de dominancia

El primero de los métodos desarrollados en el presente proyecto se basa en la intensidad de dominancia entre pares de alternativas.

Para la aplicación de este método debemos comenzar explicando el concepto de preferencia. Entendemos por preferencia, en nuestro caso, la elección de una alternativa frente a otra u otras con las que es comparada. De esta forma, ante un problema concreto en el que el usuario otorga diferentes valores a cada una de las opciones a elegir, podremos obtener la preferencia entre alternativas, cuyo resultado será la matriz de dominancia total.

De forma matemática, tenemos que  $A_i$  domina a  $A_j$  si:

$$x_{ik} \geq x_{jk} \quad k = 1, \dots, n$$

Mediante la matriz de dominancia total calcularemos para cada alternativa si esta representa una dominancia total o no frente a las demás alternativas. Este resultado lo obtendremos en función de si la alternativa observada domina al resto, debe ser dominante sobre todas las restantes, o no. En caso afirmativo estaremos ante una alternativa dominante. Si la alternativa es dominada por cada una de las demás opciones, esta será dominada en la matriz final.

En la matriz final podemos encontrar que varias soluciones son válidas, debido a que no contamos con información sobre la importancia de los criterios. Serán aceptables todas aquellas alternativas que no resulten dominadas en el proceso de elección.

Entre las principales ventajas de este método podemos destacar su sencillez, tanto en su desarrollo como en la computación del mismo.

El método de dominancia será de gran utilidad en aquellas situaciones en las cuales la normalización sea compleja, puesto que no es necesario realizarla.

### 3.2 Método MAX-MIN

El método Max-Min es conocido por ser el método empleado por los “pesimistas”, puesto que se basa en llegar a una solución para el problema planteado por medio de, en primer lugar, la elección del criterio peor valorado para cada una de las alternativas, quedándonos posteriormente con el valor más alto de los seleccionados, siendo su correspondiente alternativa la elegida.

En este caso será necesario contar con información del entorno, es decir, la solución depende de los valores de todos los atributos para las distintas alternativas.

Si lo expresamos en términos matemáticos, la mejor alternativa será aquella que cumpla:

$$A_{\text{óptima}} = \{A_i / \max_i \min_j x_{ij}\}$$

Si encontramos más de un valor que cumpla lo anterior, tendremos tantas soluciones óptimas como las veces que se repita dicho valor.

Antes de la aplicación de este método será necesario normalizar los datos de entrada en el problema, siendo esta una ventaja puesto que de esta forma todos los criterios son medidos en la misma escala. Si la normalización resulta compleja puede no ser recomendable este método.

Se trata de un método no compensatorio, puesto que los valores de los diferentes criterios para una alternativa no repercuten en la decisión final, ya que solo nos centramos en la valoración más baja de cada alternativa.

### 3.3 Método MAX-MAX

La metodología que llevamos a cabo al aplicar el método Max-Max es semejante a la explicada en el punto anterior, sin embargo, el criterio empleado para la elección de la mejor alternativa posible es, en contraposición al método Max-Min, el adoptado por los decisores más optimistas.

Con la información que nos proporciona el entorno elegiremos el criterio más valorado para cada alternativa. Una vez hayamos identificado estos datos, la mejor alternativa será aquella que mayor valor proporcione en su mejor valoración, es decir, aquella que tenga el número más alto. De este modo nos damos cuenta que estamos ante un método en el cual es necesario normalizar, puesto que han de ser comparados los distintos criterios.

Si expresamos este método de forma matemática tenemos:

$$A_{\text{óptima}} = \{A_i / \max_i \max_j x_{ij}\}$$

En cuanto a las ventajas que conlleva, son las mismas que el método Max-Min, es decir se trata de un procedimiento sencillo y fácil implementar de manera computacional. También es no compensatorio.

### 3.4 Método conjuntivo

Ahora el decisor debe especificar un nivel mínimo aceptable para cada criterio. Este valor servirá para eliminar todas las aquellas alternativas que no alcancen dicho valor mínimo en alguno de sus atributos. De este modo el resultado de la matriz nos proporcionará todas las alternativas en las cuales cada uno de sus valores es apto para el decisor, es decir, las alternativas que cumplen los requisitos mínimos para cada uno de sus criterios.

En este método se produce gran pérdida de información, puesto que no se analizan en ningún momento los criterios que si superan el valor mínimo.

Se trata de un método no compensatorio, puesto que la elección se realiza en base a el umbral establecido para cada criterio, por lo que las valoraciones para los criterios son independientes entre sí.

En este caso no es necesario normalizar, pero debemos prestar atención en cuanto a la valoración del criterio, es decir si este es creciente o decreciente. En el caso de ser un criterio creciente, los valores que superen el valor mínimo establecido para dicho criterio serán aceptables, lo contrario ocurrirá si el criterio es decreciente, pues cuanto mayor sea el criterio peor será su valoración, de esta forma en un criterio decreciente aceptaremos aquellas alternativas en las cuales el valor numérico sea más bajo para el establecido para ese criterio.

Matemáticamente tenemos:

$$x_{ij} \geq x_j^0 \quad j = 1, \dots, n$$

Siendo  $x_j^0$  el valor mínimo aceptable para el atributo  $j$ .

### 3.5 Método Disyuntivo

Para la aplicación de este método debemos establecer un valor mínimo para cada criterio, como en el punto anterior. La principal diferencia radica en la forma de establecer las alternativas válidas. En este caso, una alternativa resulta aceptable si en alguno de sus criterios supera el umbral establecido, sin necesidad de verificar los demás, de forma que con que al menos uno de los criterios resulte aceptable, la alternativa será elegida.

El método puede ser desarrollado sin normalizar los datos que aporta el usuario, y también debemos prestar atención a si los criterios son crecientes o decrecientes.

Del mismo modo se trata de un método no compensatorio, un criterio no cambia su situación en función de los demás.

De forma matemática tenemos:

$$x_{ij} \geq x_j^0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Siendo  $x_j^0$  el valor mínimo aceptable para el atributo  $j$ .

En este método se produce gran pérdida de información, puesto que no se analizan en ningún momento los criterios que si superan el valor mínimo.

### 3.6 Método lexicográfico

Si el decisor considera que los métodos ponderados enmascaran los mejores atributos de una alternativa al tomar un promedio ponderado de los mismo será interesante la aplicación del método lexicográfico sobre el problema.

A la hora de hablar de este método, debemos resaltar como característica principal del mismo la importancia de los atributos individuales, puesto que se ejecuta mediante la eliminación secuencial por orden de importancia de los criterios para el decisor.

La forma de encontrar la mejor solución para el problema se realiza por reducción de alternativas según el valor de sus criterios conforme a la ordenación de los mismos asignada. Es decir, la primera alternativa que obtendremos será aquella que cuente con el mayor valor para el atributo más valorado por el analista. Mediante la reiteración de este proceso, obtendremos la ordenación de las alternativas a estudiar.

Si en un determinado paso hemos alcanzado la situación en la cual dos o más alternativas tengan el mismo valor para el atributo mejor puntuado en este momento, debemos mirar el siguiente atributo más valorado por el analista. La alternativa, de las empatadas en el mejor atributo, que contenga el valor más alto en este siguiente atributo será la alternativa elegida para la ordenación. En el caso de que el empate persista, repetiremos el proceso hasta encontrar un criterio en el cual las alternativas tengan diferentes valores.

Mediante este proceso obtendremos una ordenación basada en las preferencias del decisor, puesto que será el quien otorgue los pesos correspondientes a los criterios, pudiendo con este método elegir en primer lugar las alternativas que mejor valoración tengan para dichos atributos.

En este caso no es necesario normalizar, puesto que solo se comparan los valores dentro de un mismo atributo.

El método lexicográfico se trata de un método no compensatorio, pues un atributo con buena valoración no hace que los demás también mejoren en su valoración.

Como todos los métodos estudiados hasta este momento, se trata de una manera de ayuda a la toma de decisión sencilla y de fácil computación. Por otro lado, aunque la exigencia de información es baja, no requiere muchos datos, esta se ve desaprovechada en gran medida.

### **3.7 Método de Suma Ponderada**

En el momento cual el analista nos proporciona más información acerca de los criterios del sistema, como cuales son los criterios más valorados para la toma de decisión o cuanto más relevante es un criterio que otro, pasamos a hablar de métodos para la ayuda de toma de decisión cardinales.

Cuando trabajamos con métodos cardinales entra en juego un nuevo término, la ponderación de atributos. Entendemos como ponderar la realización de un simple análisis estadístico, en el cual, mediante el empleo de coeficientes de ponderación o pesos, asignaremos importancias diferentes a los criterios mediante la valoración numérica de los mismos. En nuestro caso, el usuario debe ser quien realice esta evaluación, otorgando así el peso correspondiente a cada atributo.

En el método que pasamos a exponer, el decisor debe realizar la ponderación de cada uno de los criterios. En este caso no es necesario que los pesos sean normalizados.

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

Una vez que han sido otorgado un peso para cada criterio, pasamos a calcular para cada alternativa la suma ponderada de sus atributos. De esta forma obtendremos un valor para cada alternativa por medio del cual se ordenarán las diferentes soluciones expuestas para el modelo.

Queda reflejado, por la naturaleza de la formulación explicada que se trata de un método compensatorio, pues los criterios en los cuales una alternativa alcance buena valoración servirán para contrarrestar aquellos en los que la alternativa estudiada obtenga puntuaciones menores.

Expresando la suma ponderada que debemos realizar de forma matemática, tenemos:

$$v_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij}$$

Donde:

- $v_i$ , valor para la alternativa  $i$ , resultado de la suma ponderada
- $w_j$ , peso asignado al criterio  $j$
- $x_{ij}$ , valoración para la alternativa  $i$  en el criterio  $j$

Debemos tener en cuenta que, aunque no es necesario que los valores establecidos para los pesos sean normalizados, si hay que normalizar las valoraciones de las alternativas en los diferentes atributos estudiados.

El método de suma ponderada es uno de los métodos más empleados y conocidos, por su sencillez y facilidad de implementación.

### 3.8 Método de Producto Ponderado

El producto ponderado se trata de un procedimiento para la toma de decisión que también está definido dentro de los métodos cardinales, puesto que el decisor debe proporcionarnos información sobre los criterios en base a sus preferencias. Sin embargo, en este caso si será necesaria la normalización de los pesos a la hora de realizar la ponderación, del mismo modo debemos normalizar los valores de las alternativas en los criterios de estudio.

La forma de implementar el método es similar al método anterior, sin embargo, en este caso estamos ante un método compensatorio no lineal, pues ahora las alternativas cuyos atributos adquieran valoraciones bajas resultan penalizadas frente a las alternativas que presentan mayor estabilidad en las puntuaciones de sus criterios. En otros términos, conseguirán mejor posicionamiento en la ordenación final aquellas alternativas que contengan valores más estables en sus atributos. Esto

lo conseguimos mediante la multiplicación iterativa de los valores establecidos en los atributos para cada alternativa elevados al valor de cada criterio ponderado.

Expresándolo en términos matemáticos tenemos:

$$v_i = \prod_{j=1}^n x_{ij}^{w_j}$$

donde:

- $v_i$ , valor para la alternativa  $i$ , resultado del producto ponderado
- $w_j$ , peso asignado al criterio  $j$
- $x_{ij}$ , valoración para la alternativa  $i$  en el criterio  $j$

### 3.9 Método de Asignación lineal

Entre 1976 y 1978 Blin desarrolla el método de Asignación Lineal. Este se corresponde con un método compensatorio que requiere únicamente un preorden, por cada atributo, siendo este proporcionado por el decisor al completar la matriz de datos principal. De esta forma conoceremos tanto la evaluación de las alternativas como pesos cardinales asignados, por lo que podemos enunciar que nos encontramos ante un método semicualitativo, pues no es necesario conocer una asignación numérica de los atributos.

El procedimiento ejecutado mediante este método hasta obtener la solución final, se basa en la jerarquización de las alternativas para cada criterio. En el tratamos de obtener la jerarquía o posición de una alternativa dentro del conjunto de alternativas para un criterio determinado.

Dicha ordenación se realizará asignando pesos a las alternativas según la valoración aportada por el decisor mediante la matriz de decisión, siendo todos los criterios, por ejemplo, positivos, alcanzarás las primeras posiciones o valores más bajos, aquellas alternativas que para los criterios estudiados obtengan mayores valores, hasta las alternativas peor valoradas para cada criterio. De esta forma, al sumar todas las valoraciones obtenidas para cada criterio para las alternativas podremos obtener la ordenación final de las alternativas. Esta ordenación debe ser realizada en función de la puntuación obtenida al sumar cada valoración, y tendremos que, las mejores alternativas resultarán aquellas que dicha suma sea más baja, y a medida que este valor suba, la alternativa correspondiente alcanzará peor posición en la ordenación final. De esta forma podremos proporcionar al decisor una ordenación según la preferencia de alternativas para las valoraciones asignadas a cada criterio.

### 3.10 Método TOPSIS

El método TOPSIS o Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, aparece por primera vez en 1981 de la mano de Hwang y Yoon, estos continuaron con su evolución y mejora, contando con la colaboración de Zeleny y otros autores, entre 1987 y 1992.

Este procedimiento se trata de un modelo de decisión propuesto para ordenar preferencias por similitud a una solución o alternativa ideal. El concepto de alternativa ideal es presentado por Zeleny, quien da a conocer el término solución de compromiso, o alternativa más próxima al ideal. Para este autor, tanto el concepto de ideal como el de solución de compromiso radican en una hipótesis sobre la racionalidad subyacente en todos los problemas de decisión que se plantean ante el ser humano.

La base del método TOPSIS por tanto radica en la elección de la alternativa más próxima a la solución ideal positiva y más lejana a la solución ideal negativa. Esto es si hablamos en términos de distancia, la alternativa elegida será la que menor distancia tenga con la solución ideal positiva y mayor distancia con la solución ideal negativa. Entendemos como solución ideal aquella que represente una colección de puntuaciones o valores en todos los criterios considerados en la decisión, aún siendo este valor inalcanzable.

Como en todos los métodos estudiados partimos de una serie de alternativas  $A_i$  con  $i=1,2,\dots,m$  y una matriz de decisión con  $x_{ij} = U_j(A_i)$ ,  $j = 1,2, \dots, n$ , siendo  $U$  la función utilidad del decisor.

Los pesos asignados a cada criterio deben ser normalizados. Del mismo modo, transformaremos todas las utilidades asignadas a los criterios por medio de la matriz de alternativas y atributos apoyándonos en el vector unitario ya comentado, de la forma:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}$$

Y multiplicamos cada valor de la matriz normalizada mediante este método por el peso relativo de su criterio correspondiente.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

Con ello podemos definir dos conceptos:

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

· Punto ideal en  $R^n$ , que será el punto  $v^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+)$ , donde  $v_i^+ = \text{Max}_i v_{ij}$ . En el caso de no haber realizado aún la normalización pertinente, en este momento elegiremos  $v_i^+ = \text{Max}_i v_{ij}$  para los criterios crecientes y  $v_i^- = \text{Min}_i v_{ij}$  para criterios decrecientes. De esta forma, obtenemos  $v^+$  o alternativa ideal. Con ello formamos para todas las alternativas el vector,  $A^+$ .

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \begin{cases} \text{max}v_{ij}, j \in J \\ \text{min}v_{ij}, j \in J' \end{cases}$$

donde, J se corresponde con los criterios crecientes y J' con los decrecientes.

· Punto anti-ideal en  $R^n$ , siendo identificado como  $v^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-)$ , donde  $v_i^- = \text{Min}_i v_{ij}$ . Como en el punto anterior, si aún no ha sido realizada la normalización, tendremos que  $v_i^- = \text{Min}_i v_{ij}$  para criterios crecientes y  $v_i^+ = \text{Max}_i v_{ij}$  para criterios decrecientes. Así construiremos la alternativa anti-ideal,  $v^-$ . Para todas las alternativas tenemos  $A^-$ .

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \begin{cases} \text{min}v_{ij}, j \in J \\ \text{max}v_{ij}, j \in J' \end{cases}$$

Si planteamos un ejemplo, podemos ver el dilema que puede ser generarse, llevándonos a diferentes resultados si sólo nos fijamos en uno de los dos términos antes definidos. En el ejemplo (Ilustración 3) que se muestra a continuación, observamos la representación de cinco alternativas (A, B, C, D y E) para un problema de dos criterios. También, han sido representados los puntos ideal y anti-ideal, mediante la métrica de la distancia euclídea para pesos iguales.

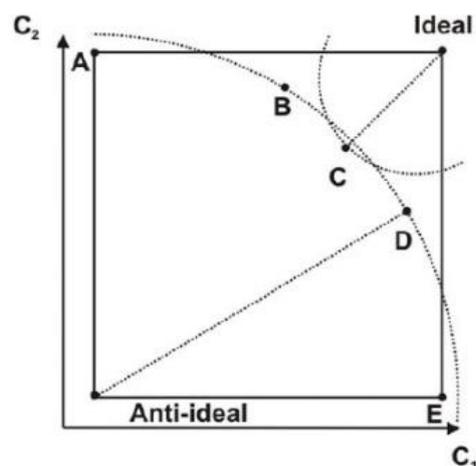


Ilustración 3, Representación del método TOPSIS

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

Es inmediato al analizar la ilustración, que la alternativa C es la más próxima al punto ideal, mientras que D es la que mayor distancia guarda con la alternativa anti-ideal.

Ante la incertidumbre planteada, podremos resolver el problema mediante una idea propuesta y empleada por Dasarathy, en un contexto de análisis multivariante de datos. Así pues, esta idea radica en que para cada alternativa  $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  debemos calcular  $d_p^+(A_i)$  y  $d_p^-(A_i)$ , o distancias ponderadas al ideal y anti-ideal según la métrica  $p$  elegida. Estas distancias se muestran como:

$$d_p^+(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |v_{ij} - v_j^+|^p \right]^{1/p}$$

$$d_p^-(A_i) = \left[ \sum_j w_j^p |v_{ij} - v_j^-|^p \right]^{1/p}$$

donde,  $p$  es el parámetro de distancia, y  $w$ , el peso de importancia. Los valores más empleados son  $p=1$ ,  $p=2$  y  $p=\infty$ .

Con estos parámetros distancia obtenemos:

· Para  $p=1$ , distancia ciudad:

$$d^+(A_i) = \sum_j w_j |v_{ij} - v_j^+|^2$$

· Para  $p=2$ , distancia euclídea:

$$d_p^+(A_i) = \sum_j w_j^p |v_{ij} - v_j^+|^{1/2}$$

· Para  $p=\infty$ :

$$d^+(A_i) = \text{Max}_j (w_j |v_{ij} - v_j^+|)$$

Conocidas la distancia ideal,  $d_p^+(A_i)$ , y la distancia anti-ideal,  $d_p^-(A_i)$ , podemos pasar a determinar el Ratio de similaridad al ideal:

$$I_p(A_i) = \frac{d_p^-(A_i)}{d_p^+(A_i) + d_p^-(A_i)}$$

Este indicador varía desde  $I_p(A^-) = 0$  para la solución anti-ideal, hasta  $I_p(A^+) = 1$  para la solución ideal.

El Ratio de Similitud,  $I_p(A_i)$ , será empleado para la ordenación final de las alternativas. Mediante este indicador podremos obtener las distancias hasta la solución ideal o ideal positiva y la anti-ideal o ideal negativa. Cuando más cercano sea este valor a la unidad, mejor será la posición obtenida respecto a la jerarquía de alternativas realizada.

Para interpretar correctamente la información que nos aporta el Ratio de Similitud, debemos aclarar que no hablamos, en términos lingüísticos, de similitud, sino de similitud. Sin embargo, lo que este término busca es hallar la proximidad relativa respecto a una alternativa ideal, mediante la combinación de la cercanía a la solución ideal y la lejanía a la solución anti-ideal. De este modo, para la elección de alternativas se procederá eligiendo como mejor, aquella ubicada lo más cerca posible a la máxima similitud respecto a la ideal, pues mediante este indicador, contemplamos tanto la distancia positiva como la negativa.

### 3.11 Método AHP

#### 3.11.1 Introducción y características

El siguiente método formulado para la resolución de problemas multiatributo se enmarca dentro de los métodos eigenpesos, o métodos de asignación de pesos basados en el cálculo del autovector dominante de una matriz de comparaciones binarias de los criterios, en este caso. Aunque el nacimiento de esta tipología de métodos multiatributo se asocia al método DARE, el cual no es motivo de estudio de este proyecto, en la actualidad el principal representante de los métodos eigenpesos es el AHP o Proceso Analítico Jerárquico.

La propuesta del método AHP parece de la mano del profesor Thomas L.Saaty, entorno a inicios de los años ochenta. Saaty propone este método como una teoría general sobre juicios y valoraciones, basado en escalas de razón y redes, en las cuales cobra gran peso la jerarquización de en las relaciones de objetos y propósitos. Por lo que con este método su autor busca obtener a partir de un problema multidimensional, o muticriterio, un problema que cuente con una escala unidimensional, o escala de prioridades, que represente unas salidas globales al mismo.

Las características más representativas del método AHP son las siguientes:

- Emplea jerarquías con el fin de transformar un modelo mental en un modelo estructural con el que podamos trabajar. Por ello busca a través de estas jerarquías y redes descomponer un problema complejo en partes más sencillas. Lo que nos lleva a representar de esta forma tanto atributos y alternativas como la interrelación y la dependencia entre dichos factores.
- Mediante conglomerados logra integrar las partes más pequeñas en otras más grandes. Siendo los elementos agrupados del mismo orden de magnitud, pues así se consigue mayor precisión en el método, este número de elementos que forman el conglomerado debe estar acotado por el conocido número de Miller  $7 \pm 2$ , propuesto por Miller en 1956.
- Ante la comparación de preferencias de alternativas sabemos que han de ser pareadas. Eso es necesario, pues tenemos que trabajar con medidas relativas que proceden de aspectos intangibles llevándoles a un contexto tangible. Para ello usualmente tomaremos como unidad de referencia el elemento con menor grado, al cual preguntaremos la importancia, preferencia o verisimilitud frente a otro de los restantes de mayor grado, pues este segundo dominará al primero. Con ello alcanzaremos una matriz de juicios en la que las comparaciones pareadas serán recíprocas.
- Como escala fundamental se sigue manteniendo la propuesta por Saaty, mediante la que introduciremos juicios o valoraciones del decisor. La escala, aunque la comentaremos en más detalle en los siguientes pasos, debe ser estrictamente positiva y nos permitirá eliminar ambigüedades en las que el ser humano entra al comparar elementos en la proximidad del cero o del infinito.
- Se emplea el submétodo del autovector principal por la derecha, por lo cual estamos ante un procedimiento eigenpesos, para obtener prioridades locales. Este también se apoya en el principio de composición jerárquico para calcular prioridades globales y de una forma lineal aditiva para obtener la ordenación final. Otra de las ventajas que nos aportan estas herramientas radica en la posibilidad de evaluación analítica de la consistencia del decisor a la hora de emitir juicios.
- Emplearemos escalas de razón para obtener prioridades derivadas. Mediante estas escalas conseguimos generalizar la teoría de la decisión al caso de dependencia y retroalimentación. Dentro de estas escalas podremos multiplicar y sumar cuando los elementos pertenecen a la misma escala, es el caso de las prioridades. Con estas escalas normalizadas obtenemos, en este método, valores que reflejan la dominación entre elementos en una escala absoluta, en la cual podremos realizar tanto procesos de ponderación como adición.

Emplearemos la metodología AHP cuando las decisiones a evaluar presenten cierto grado de complejidad. En resumen, el método AHP se basa en la existencia de una complejidad inherente en problemas compuestos por estructuras jerarquizadas formadas por una meta, así como, una serie de criterios y alternativas. En cada nivel jerárquico, se efectúan comparaciones por pares con asignaciones numéricas dentro de la escala absoluta fundamental, ya comentada. El resultado de estas comparaciones radica en las matrices de dominación.

### 3.11.2 Fases del método AHP

A continuación, explicaremos las cuatro etapas fundamentales mediante las cuales podemos realizar el análisis de un problema mediante el método AHP.

1º Etapa, Modelización: aquí realizaremos la jerarquización de nuestro planteamiento. Es decir, organizaremos nuestras ideas, definiendo el objetivo o meta, los criterios y proponiendo las diferentes alternativas de estudio. Esta etapa es la menos sistemática ya que al realizar las jerarquías de cada subcriterio cada analista defenderá las decisiones que ha tomado.

2º Etapa, Establecimiento de valoraciones: ahora buscamos plasmar los gustos, opiniones y criterios del decisor en matrices de comparación pareadas. En ellas veremos representadas las preferencias entre los diferentes criterios junto con las respectivas valoraciones de cada alternativa.

3º Etapa, Priorización y síntesis: una vez que contamos con la información obtenida en los apartados anteriores pasamos a realizar los cálculos pertinentes, con lo que obtendremos prioridades en las diferentes alternativas. Comúnmente, las prioridades pueden ser de tres tipos:

- Prioridades locales, en las que los elementos cuelgan de un nodo común. En este caso, se medirán en escalas de razón de las magnitudes relativas y a partir de ellas obtenemos la matriz recíproca de comparaciones pareadas.

- Prioridades globales, nos proporcionan información sobre la importancia de elementos aislados y únicos en comparación con la meta planteada en los primeros apartados. Para conocer este tipo de prioridades, se multiplicarán los diferentes coeficientes que aparecen en el recorrido de su jerarquía hasta llegar a la meta.

- Prioridad final o total, nos muestra la importancia absoluta que muestra una alternativa respecto a las demás. La alternativa que muestre mayor prioridad total será aquella que teniendo en cuenta los criterios adoptados por el decisor se promulgará como mejor solución al problema. Para calcular esta prioridad antes conoceremos las

prioridades globales de cada camino que la puedan unir con la meta y después las sumamos.

4º Etapa. Análisis de la consistencia: o, dicho de otro modo, cálculo de la consistencia de los juicios de los expertos.

Para comprender mejor el funcionamiento del método, explicaremos en más detalle cada una de las etapas comentadas:

### 3.11.2.1 Modelización:

Comenzamos definiendo cual es el objetivo del problema según el decisor. Una vez hecho esto, debemos seleccionar las diferentes alternativas, teniendo en cuenta que todas podrían ser seleccionadas como mejor opción, cumpliendo todas los mismos condicionantes, dentro del mismo contexto y respetando las mismas características básicas.

Una vez tenemos las alternativas y el objetivo final, debemos definir cuáles serán los criterios que representen al problema de la forma más compleja y global posible dentro del contexto en el cual hemos planteado el problema.

En el caso de los criterios, estos deben ser cuantificables y medibles, si no es así, no se podrá implementar el método AHP, pues los criterios no se podrán medir ni comparar. Del mismo modo, deben seguir una estructura jerarquizada descendiente desde un objetivo, desde este, se elegirán los criterios que por descomposición son subjetivos y que más tarde nos permitirán valorar las diferentes alternativas para cada criterio.

El siguiente paso dentro de esta etapa consiste en colocar las diferentes alternativas en el nivel más bajo de la jerarquía. Con ello obtendremos una estructura jerarquizada, más o menos compleja, con la siguiente forma (Ilustración 4):

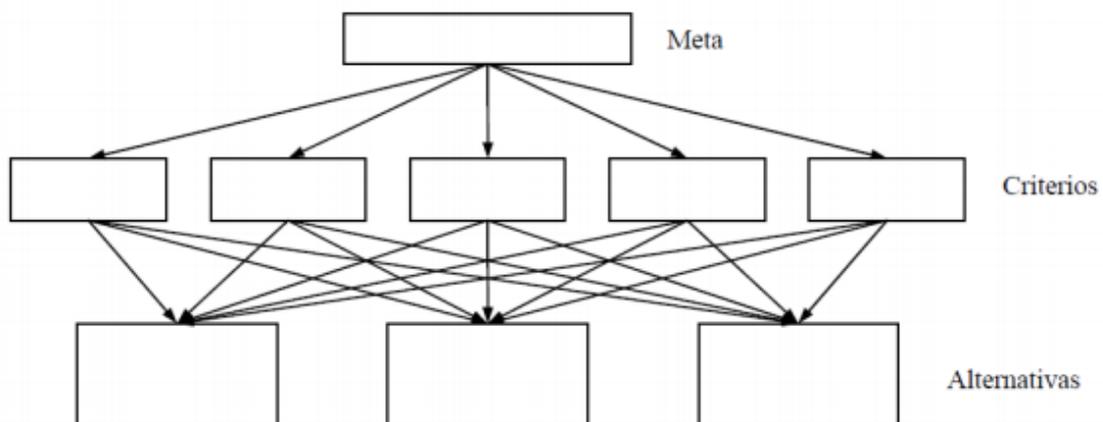


Ilustración 4. Estructura jerarquizada del método AHP (Ferris, 2005)

Esta jerarquización trata de buscar una estructura en la cual al modelizar el problema los elementos de un nivel no dependan de los descendientes ni de los hermanos. De esta manera tenemos:

- Nivel 0, o nivel superior de la jerarquía. En que se coloca la meta global o fin último del problema.
- Nivel 1, donde posicionaremos los criterios considerados.
- Nivel 2, aquí debemos ubicar las alternativas.

Este caso es el más sencillo, pudiendo ampliarse el número de niveles tanto como se desee, dotando de precisión al modelo, lo que nos acercará cada vez más a la realidad. La jerarquía resultante debe cumplir con las propiedades antes comentadas, es decir, debe ser completa, representativa, no redundante y minimal.

Existe una jerarquía, que consiste en la división de la jerarquía global en otras más precisas, cuyo uso está muy extendido, conocida como Análisis coste beneficio (AHP-B/C).

### 3.11.2.2 Establecimiento de valoraciones:

Tras finalizar la primera etapa, en la cual conocemos las alternativas y definimos los criterios, pasamos a ponderar cada uno de los criterios. El objetivo final de esta etapa busca medir la importancia que el decisor asigna a cada uno de los criterios y alternativas.

En este proceso el decisor debe comparar de forma pareada cada uno de los elementos del mismo nivel, con ayuda de preguntas del tipo:

- ¿Es del criterio  $i$  igual, ..., o más importante que el criterio  $j$ ?
- Respecto al criterio  $j$ , ¿es la alternativa  $i$  igual, ..., más importante, que la  $j$ ?

Para realizar estas comparaciones emplearemos la escala definida por Saaty, que se ve mostrada en la siguiente tabla (Tabla 2) con exactitud en la correlación entre valoración numérica y cualitativa:

| VALOR                        | DEFINICIÓN  | COMENTARIOS  |
|------------------------------|---|--|
| 1                            | Igual importancia   | El criterio o alternativa A es igual de importante que el criterio o alternativa B   |
| 3                            | Importancia moderada  | La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio o alternativa A sobre B |
| 5                            | Importancia grande  | La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio o alternativa A sobre B |
| 7                            | Importancia muy grande  | El criterio o alternativa A es mucho más importante que el B                         |
| 9                            | Importancia extrema   | La importancia del criterio o alternativa A sobre el B está fuera de toda duda       |
| 2,4,6,8                      | Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar   |  |
| Recíprocos de los anteriores | Si el atributo o la alternativa A es de importancia grande frente al criterio o alternativa B, las nociones serán las siguientes:<br>· Criterio o alternativa A frente a criterio o alternativa B: 5/1<br>· Criterio o alternativa B frente a criterio o alternativa A: 1/5 |  |

Tabla 2: Escala fundamental de comparación de pares (Saaty, 1980)

Los números presentes en la escala definida por Saaty, nos muestran información sobre la proporción en la que uno de los elementos, considerado en la comparación pareada, domina a otro respecto a un criterio que tienen en común. Una vez han sido valorados todos los pares de alternativas y criterios obtenemos una serie de matrices con la forma:  $A_{n \times m}$  tal que  $A = [a_{ij}]$ ,  $i \geq 1, j \leq n$ . El término  $a_{ij}$  representa la comparación entre el elemento  $i$  y el elemento  $j$  a partir de los valores de la escala fundamental.

Debemos tener en cuenta los siguientes axiomas al construir la matriz:

- Axioma de reciprocidad, al comparar un par de elementos, si el elemento A domina por  $x$  veces al elemento B, debe cumplirse que el elemento B domine  $x^{-1}$  veces al elemento A. O expresado de otra forma, si  $a_{ij} = x$ , entonces  $a_{ji} = 1/x$ .

- Axioma de homogeneidad, los elementos que se comparen entre sí, deben ser del mismo orden de magnitud jerarquía, estableciendo las preferencias entre ellos mediante la escala de comparabilidad de Saaty.

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

- Axioma de independencia: al realizar las comparaciones, suponemos que los criterios son independientes con las propiedades de las alternativas.
- Axioma de expectativas: la jerarquía debe cumplir con las expectativas del decisor, siendo esta completa con todos los elementos, sin faltar o sobrar ninguno.

Con lo comentado hasta ahora, obtendremos una matriz como la representada a continuación:

|       | $A_1$    | $A_2$    | $A_3$    | $A_4$    |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| $A_1$ | 1        | $a_{12}$ | $a_{13}$ | $a_{14}$ |
| $A_2$ | $a_{21}$ | 1        | $a_{23}$ | $a_{24}$ |
| $A_3$ | $a_{31}$ | $a_{32}$ | 1        | $a_{34}$ |
| $A_4$ | $a_{41}$ | $a_{42}$ | $a_{43}$ | 1        |

Tabla 3: Ejemplo: matriz de comparaciones pareadas

Donde  $A_i$  representa a los criterios o alternativas y  $a_{ij}$  sus respectivas valoraciones.

### 3.11.2.3 Priorización y síntesis

Tras construir la matriz de comparación pareada durante el anterior apartado, pasamos a calcular la prioridad, o fuerza otorgada por el decisor a cada elemento de del problema.

En este paso podemos encontrar cuatro aproximaciones matemáticas, entre las cuales el decisor debe elegir, para la formación de los vectores propios de cada criterio, así como, de la matriz de criterios. Los modelos de aproximaciones que podemos encontrar son, en nuestro caso:

- Modelo 1: se procede sumando los elementos de cada fila y los normalizamos dividiendo cada una de estas sumas por la suma de todas las filas. Siendo el vector resultante el que usemos como vector de pesos.
- Modelo 2: debemos sumar los elementos de cada columna y formar el inverso de estos. Para la normalización debemos dividir cada inverso por la suma de los inversos. El vector que obtenemos es el vector de pesos.
- Modelo 3: primero normalizamos las columnas, esto se consigue dividiendo los elementos de cada columna por la suma de esta columna. Después realizamos la suma de los elementos de cada fila, ya normalizados por columnas, y estos son divididos por el número de elementos de cada fila, para normalizarlos dividimos cada una de estas sumas por la suma de las sumas de todas las filas. Con ello obtenemos el vector de pesos.

· Modelo 4: debemos multiplicar los elementos de cada fila y hacer la raíz n-ésima. Después se normalizan los resultados, siendo el vector resultante el que usamos como vector de pesos.

Estas prioridades de cada elemento se muestran expresadas en forma de vectores. Los vectores son calculados a partir de cada matriz A (nxn), obtenidas tras realizar las valoraciones ponderadas. Otro concepto nuevo que introducimos se trata de los autovalores o vectores propios de A ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ) siendo estos las soluciones de la ecuación:  $\det(A - \lambda I) = 0$ .

Dentro de estos autovalores nos resultará de interés el autovalor principal de la matriz ( $\lambda_{max}$ ), siendo este el máximo de los autovalores obtenidos de la solución antes mostrada. Si estudiamos el caso ideal,  $\lambda$  es el autovalor dominante de A y  $a$  es el autovector asociado. El autovector asociado al autovalor dominante es el vector de prioridades al cual deseamos llegar.

En el caso de que el vector propio obtenido se corresponda con el de la matriz de criterios, le llamaremos  $V_c$ , y nos indicará el peso o importancia relativa de cada uno de los criterios utilizados dentro de la valoración del conjunto de alternativas que son estudio de nuestro problema.

Por el contrario, si el vector propio obtenido es el de la matriz de alternativas para un criterio determinado, lo enunciaremos como  $V_{ai}$ , siendo este un vector columna, y nos proporcionará el peso o importancia relativa de cada una de las alternativas para el criterio i. De esta forma obtendremos tantos vectores propios como criterios.

Mediante este método podemos llegar a conocer la calidad de la decisión final, esto lo conseguimos por medio de la evaluación de la consistencia de los juicios que el decisor establece al rellenar las matrices pareadas. Debemos tener en cuenta que, al ser valoraciones establecidas por seres humanos, siempre ha de ser contemplado cierto grado de inconsistencia. Esto lo estudiaremos durante la siguiente etapa.

### 3.11.2.4 Análisis de consistencia

Para que el problema sea de utilidad para ayudar al decisor a escoger la mejor alternativa planteada, las matrices pareadas deben ser consistentes, lo cual debemos comprobar antes de realizar el cálculo de sus vectores propios.

Definiremos como consistencia, el caso en el cual la matriz de comparaciones pareadas lo es, dicho de otro modo, que  $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k$ .

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

La comprobación de las matrices de consistencia se lleva a cabo a partir del índice de consistencia IC, el cual determinará el grado de consistencia de nuestra matriz. El cálculo del Índice de consistencia IC, se muestra a continuación.

En primer lugar, hemos de multiplicar los n elementos de cada fila y se realiza la matriz n-ésima de cada multiplicación. Tras ello, normalizamos el vector obtenido, B.

$$B = \left( \frac{\sqrt[n]{e_{11}}}{\sum e_{i1}}, \frac{\sqrt[n]{e_{21}}}{\sum e_{i1}}, \dots, \frac{\sqrt[n]{e_{n1}}}{\sum e_{i1}} \right)^T$$

A continuación, multiplicamos la matriz A por el vector B.

$$C = A \times B$$

Y para concluir, este nuevo vector obtenido, C, debe ser dividido entre el vector B que se había obtenido anteriormente, y realizamos la media geométrica de este nuevo vector, D, obtenido.

$$D = \frac{C}{B}$$

$$\lambda_{\max} = \text{media geométrica de D}$$

Cuando tenemos  $\lambda_{\max}$  podemos calcular el Índice de Consistencia, CI, mediante la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Comprobaremos la consistencia de la matriz mediante el Ratio de Consistencia, CR, que representará el valor que debería obtener el CI si los juicios numéricos otorgados por el decisor para la escala de Saaty si estos hubieran sido introducidos completamente de forma aleatoria en la matriz de comparaciones. Este se obtiene:

$$CR = \frac{CI}{\text{Consistencia aleatoria}}$$

El valor de la consistencia aleatoria con el cual compararemos el Índice de Consistencia, dependerá del tamaño de la matriz de comparaciones, estando este tabulado según la siguiente tabla (Tabla 4).

## I FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

|                         |   |   |      |      |      |      |      |     |      |      |
|-------------------------|---|---|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| Tamaño de la matriz (n) | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   | 9    | 10   |
| Consistencia aleatoria  | 0 | 0 | 0,52 | 0,89 | 1,11 | 1,25 | 1,35 | 1,4 | 1,45 | 1,49 |

Tabla 4: Valores de consistencia aleatoria en función del tamaño de la matriz. (Saaty,1980)

Para finalizar, revisamos que el Ratio de Consistencia no supere los límites establecidos:

| Tamaño de la matriz (n) | Ratio de consistencia |
|-------------------------|-----------------------|
| 3                       | 5%                    |
| 4                       | 9%                    |
| ≥5                      | 10%                   |

Tabla 5: Límites de consistencia (Elaboración propia)

Si alguna matriz supera el límite del ratio de consistencia establecido en la tabla deberemos revisar las ponderaciones realizadas por el decisor para reducir su ratio de consistencia hasta niveles admisibles.

### 3.12 Método Electre I

De la mano de Bernard Roy y su equipo de colaboradores nacen en la Universidad de París, concretamente en el centro Lasamsade, los métodos Electre, EElimination Et Choix Traduisant la REalité, en el año 1968.

La metodología que se desarrolla en esta vertiente se basa en la definición de relaciones de sobreclasificación entre cada par de alternativas, entre las cuales se puede afirmar que una alternativa A sobreclasifica a otra B, si A “es tan buena al menos” como B en un alto número de atributos y no se puede encontrar ningún atributo en el cual sea evidentemente inferior.

| Versión | I    | II           | III  | IV             | IS          | TRI  |
|---------|------|--------------|------|----------------|-------------|------|
| Autor   | Roy  | Roy, Bertier | Roy  | Roy, Hugonnard | Roy, Skalka | Yu   |
| Año     | 1968 | 1971, 1973   | 1978 | 1982           | 1985        | 1992 |

Tabla 6: Variantes del método Electre

Para el desarrollo de esta metodología debemos tener en cuenta que la elección de una variante concreta de este método estará condicionada por la problemática seleccionada, que a su vez se encuentra condicionada por la formulación del

problema planteado y del uso que quiera hacer el decisor la ayuda que proporcionan los métodos multiatributo a la toma de decisión.

Bernard Roy, propone para la elección de la problemática las siguientes definiciones (Roy y Bouyssou, 1993):

- Problemática  $\alpha$ : Mediante la selección de alternativas localizadas en un núcleo, logra definir cuáles serán incomparables entre ellas dentro de un mismo conjunto. Aunque la identificación proporciona mejores resultados que en la alternativa  $\gamma$ , en este caso entra en juego el umbral de concordancia, que consideraremos un parámetro aleatorio, pues deber ser definido por el decisor en el momento que plantee el problema. Mediante el umbral de concordancia podremos definir las alternativas que estarán dentro del núcleo planteado, por lo que esta problemática nos proporcionará un resultado poco transparente al delimitar las alternativas válidas para la resolución del problema.

- Problemática  $\beta$ , Analiza las alternativas establecidas para el problema bajo una serie de categorías predefinidas. Por medio de esta problemática logramos otorgar un valor absoluto de cada alternativa, siendo este independiente para cada una de las restantes estudiadas en el problema. Aunque el número de alternativas sea alto, mediante esta metodología no incurrimos en un proceso de cálculo extenso.

Esta segunda problemática se suele usar previamente a la implantación de la problemática  $\gamma$ , pues sirve como pulido inicial del problema planteado. Debemos definir una serie de alternativas de referencia sobre las cuales estructuraremos el problema estableciendo así los límites de las categorías. Estas alternativas de referencia pueden ser normas o valores mínimos para considerar dicha alternativa.

- Problemática  $\gamma$ , Proporciona una ordenación relativa del valor de todas las alternativas, por medio de la clasificación de las mismas de forma global. Si tenemos dos o más alternativas que se comportar de igual manera ante las demás, es decir, consideramos estas alternativas clones ante la ordenación, mediante esta problemática quedan resueltos pues serán considerados variantes de una alternativa base.

Las problemáticas comentadas pueden emplearse de manera conjunta, es decir, no tienen por qué ser independientes entre sí. Por ejemplo, mediante la ordenación podemos resolver el problema alfa si definimos unos umbrales adecuados, y definiendo las clases de beta por los valores mínimos sobre una escala emplear una ordenación previa para la clasificación.

Resulta clave, al presentar el problema, la elección del parámetro que definirá la problemática sobre la que vamos a trabajar, pues de esta forma focalizaremos el

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

caso de estudio sobre una modalidad del método Electre. De esta forma tendremos la siguiente clasificación:

- Problemática  $\alpha$ , se centra en los métodos Electre I y Electre IS.
- Problemática  $\beta$ , se basa en la implementación del Electre TRI.
- Problemática  $\gamma$ , en la cual debemos elegir entre la aplicación de los métodos Electre II, Electre III y Electre IV.

Los métodos Electre, como ya hemos comentado, se basan en la sobreclasificación de pares de alternativas, sin embargo, si profundizamos más en este concepto tenemos que en esta lógica aplicada podemos distinguir dos subgrupos:

- Lógica de sobre clasificación nítida, o descripción de los criterios de forma definida. En la cual encontramos los métodos Electre I y Electre II.
- Lógica de sobre clasificación borrosa, que emplea definición de pseudo-criterios, cuasi-criterios o pre-criterios. En este subgrupo encontramos las variantes Electre III, Electre IV, Electre IS y Electre TRI.

Clasificando los métodos según la problemática a la cual pertenecen y la lógica por la cual se produce la implementación del problema, tenemos la siguiente tabla (Tabla 7).

|         |                  | Problemática |         |         |
|---------|------------------|--------------|---------|---------|
| Lógica  | Criterios        | $\alpha$     | $\beta$ | gamma   |
| Nítida  | Definidos        | I            | --      | II      |
| Borrosa | Pseudo-criterios | IS           | TRI     | III, IV |

Tabla 7: Clasificación de métodos Electre

Como podemos observar a partir del Electre III, el desarrollo de este método se ha basado en pseudo-criterios y sobre clasificación borrosa, pues nos permite un mejor ajuste a la realidad, pues esta es la finalidad de los métodos multiatributo de ayuda a la toma de decisión.

Podemos representar gráficamente el procedimiento de elección del método Electre (Maystre, 1994).

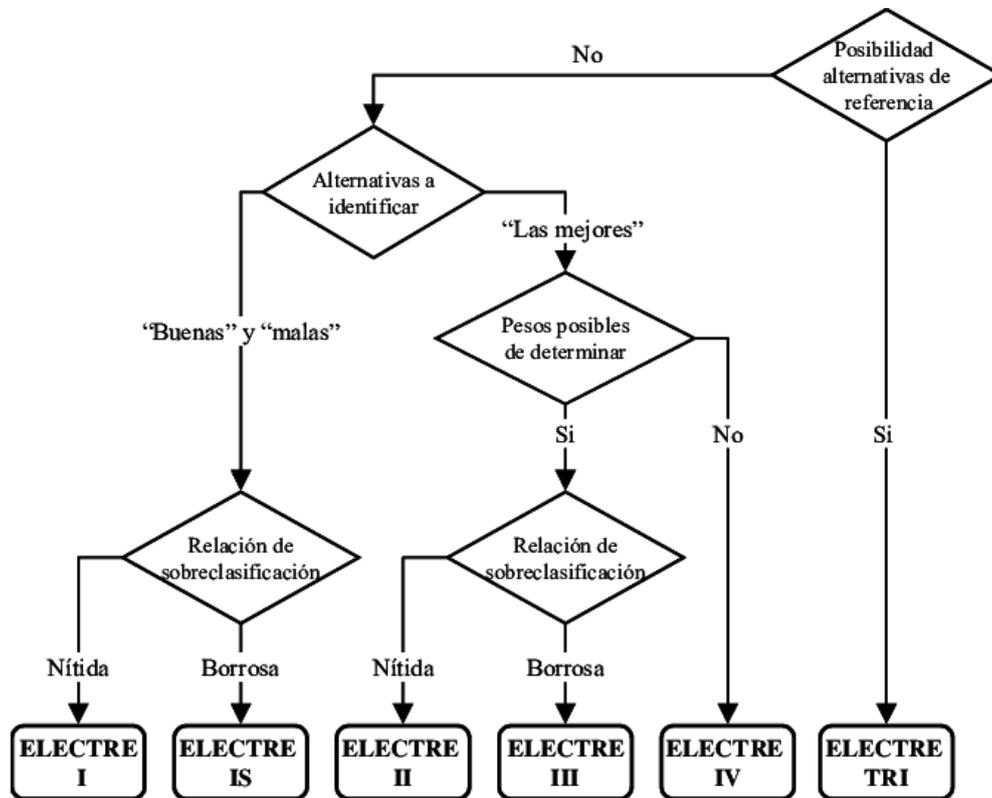


Ilustración 5: Elección de método Electre (Maystre,1994)

Si ahora nos centramos en el método implementado en este trabajo, en 1971, B.Roy publica *“Problems and Methods with Multiple Objective Functions”*, donde desarrolla el método para un conjunto de opciones A, finito y en el cual cada opción se caracteriza por n atributos excluyentes y no redundantes entre sí.

El ordenamiento empleado en este método se conoce con relación de sobreclasificación, siendo denotado por R, donde  $aRb$  indica que a esta sobreclasificado con respecto a b. Mediante el empleo del termino de R pretendemos lograr dos propósitos:

- Eliminar las opciones más débiles en el proceso de selección de la mejor de estas.
- Proporcionar un método de ayuda al decisor para examinar las preferencias.

Para poder aplicar el método Electre I el decisor debe comenzar por otorgar pesos a cada uno de los atributos del problema, de esta forma podremos establecer un orden referencial con ellos. Estos pesos deben ponderarse para poder establecer una importancia relativa que presenta cada uno de los criterios frente a todos los demás factores de decisión.

Una vez realizada la asignación de pesos correspondiente, entran en juego los test que emplearemos para reducir el número de alternativas hasta lograr que en el núcleo del problema solo podamos localizar una opción.

### 3.12.1 Índice de concordancia

El primer indicador que analizamos se trata del Índice de Concordancia, que definimos, para dos alternativas, como la suma de los pesos asociados a los criterios en los que una alternativa es mejor que la otra, contemplando casos de empate, en los cuales se asignará la mitad del peso a cada una de las alternativas. Con lo cual, podemos deducir que el propósito que tratamos de alcanzar mediante la valoración de esta condición radica en determinar si una acción es igual o superior a otra, mediante la medición de cada uno de los criterios y su importancia relativa, dicho de otro modo, el test evalúa si ante las peores circunstancias, una alternativa es mejor o igual que otra alternativa con la que es comparada.

Para realizar el Índice de Concordancia emplearemos una matriz, formada por indicadores resultantes de la comparación de la concordancia de pares de alternativas, para ello debemos comprobar el conjunto de concordancia mostrado a continuación:

$$C_c = \{j | x_{ij} \geq x_{kj}\}$$

Con lo que podemos obtener el Índice de Concordancia de la forma:

$$C_{ik} = \sum_{j \in C_c} w_j$$

donde los subíndices se identifican de la siguiente manera:

- i e k, par de alternativas comparadas
- j, cada uno de los criterios evaluados en el problema

De esta forma obtendremos una matriz donde el número de filas y columnas será igual al número de alternativas que han sido formuladas para el problema.

El Índice de Concordancia cuenta con las siguientes propiedades:

- Su valor varía entre 0 y 1, ( $0 \leq C_{ik} \leq 1$ )

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

- La ponderación otorgada crece a medida que aumenta el número de criterios para los cuales la alternativa  $i$  es mayor o igual que la alternativa  $k$ .
- El índice alcanza su valor máximo, igual a 1, cuando todos los criterios de la alternativa  $i$  son iguales o mejores que los de  $k$ .
- El índice es igual a 0, mínimo, cuando la alternativa  $i$  es peor en todos sus criterios que la  $k$ .

### 3.12.2 Índice de Discordancia

El otro test a realizar dentro del método Electre I se trata del Índice de Discordancia. Debemos realizar este análisis pues al medir la concordancia no tenemos en cuenta la importancia de la jerarquización en aquellos criterios en los cuales una alternativa es inferior a aquella con la cual está siendo comparada. Es decir, la finalidad de este indicador radica en medir el grado de intensidad con el cual divergen los criterios minoritarios, calculando el grado de desacuerdo máximo que puede existir entre las alternativas comparadas.

En este caso realizaremos la diferencia, en valor absoluto, entre los criterios para los cuales la alternativa  $i$  no domina a la alternativa  $k$ , o criterios discordantes, que será dividida por la mayor diferencia en valor absoluto alcanzada entre los resultados de la alternativa  $i$  y la  $k$ . Con lo cual este test puede formularse del siguiente modo:

Para el conjunto de discordancia:

$$C_D = \{j | x_{ij} < x_{kj}\}$$

Obtendremos el Índice de discordancia:

$$D_{ik} = \frac{1}{\delta_j} \cdot \text{Max}\{x_{kj} - x_{ij}\} \quad j \in C_D$$

donde,  $\delta_j = \text{Max}\{x_{kj} - x_{ij}\}$

Con estas comparaciones obtendremos una matriz con la misma dimensión que la realizada para el Índice de Concordancia.

El Índice de Discordancia presenta las siguientes propiedades:

- Su valor varía entre 0 y 1, ( $0 \leq D_{ik} \leq 1$ )

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

- El índice logra su valor máximo, o mayor discordancia de las alternativas, cuando dicha discordancia es equivalente a la amplitud de la escala.
- En el caso de no existir discordancia, el valor del indicador es igual a cero.

Una vez que contamos con el análisis tanto de concordancia como de discordancia, podemos realizar la clasificación que proporcionaremos al decisor como ayuda. Para establecer dicha preferencia de alternativas el método Elete I emplea dos umbrales, o niveles de exigencia, que proporcionan información sobre la fuerza de intransigencia del decisor, es decir nos indicarán el nivel de exigencia y tolerancia que es aceptado por el decisor frente a las relaciones de sobre calificación. Definidos dichos umbrales con  $p$  y  $q$ , correspondientes con los índices de concordancia y discordancia respectivamente.

Las condiciones que deben ser cumplidas para que una alternativa sobreclasifique a otra son:

1ª Condición:  $C_{ik} \geq p$ , lo que significa que el Índice de Concordancia debe ser mayor o igual que el umbral fijado por el sujeto decisor, enunciado como  $p$ . Este valor debe variar entre 0 y 1, siendo más crítico cuando más próximo al 1 se encuentre.

2ª Condición:  $D_{ik} \leq q$ , o lo que es igual a obtener un valor menor o igual al Índice de Discordancia fijado por el sujeto decisor, denominado  $q$ , para que se cumpla esta condición. El valor podrá moverse entre 0 y 1, siendo más restrictivo cuando más cercano al 0 se establezca.

Ambas condiciones deben cumplirse para que se establezca relación de sobreclasificación de la alternativa  $i$  sobre la  $k$ . Para realizar dicha comprobación en cada par de alternativas construiremos una matriz de comparación en cual el decisor podrá observar las relaciones de sobre clasificación entre pares de alternativas.

### 3.12.3 Grafo de superación

Con el fin de facilitar la toma de decisión al usuario, para el método Electre I ha sido desarrollado un elemento gráfico que facilitará la comprensión de la matriz construida. Este apoyo al método se conoce como Grafo de superación.

Con este grafo podremos comprobar que se cumplen las condiciones de concordancia y discordancia y ver las relaciones de sobre clasificación existentes para cada par de alternativas.

Visualmente, en el grafo las alternativas están representadas por los nodos, quedando el conjunto de estas dividido en dos subconjuntos. El primero de ellos

representará el núcleo, constituido por aquellas alternativas que no han resultado dominadas por ninguna otra, es decir, que no se sobreclasifican entre ellas, en el grafo observaremos que a estas alternativas no las llega ninguna flecha. En segundo o parte periférica, encontraremos aquellas alternativas que si han resultado sobreclasificadas o dominadas por al menos otra.

### 3.13 Método Promethee I y II

#### 3.13.1 Introducción y evolución histórica

En 1982 aparece por primera vez el método Promethee o Preferece Ranking Organizaion Methods for Enrichment Evaluations, de la mano de J.P. Brans.

En un primer momento Brans presenta el Promethee I, método según el cual se consigue una preordenación parcial de las alternativas disponibles para el caso estudiado, junto con el Promethee II, que completa al primero, pues logra establecer un preorden completo de las diferentes opciones evaluadas. Estos dos modelos son los que el presente Trabajo Fin de Grado abarca y representan la primera generación del método Promethee. (Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys,2005)

El método Promethee continúa evolucionando en una segunda generación, en la cual J.P.Brans junto con B.Mareschal proponen una nueva versión, Promethee III, en la cual se puede llegar a obtener un ranking de las alternativas basado en intervalos. En el Promethee IV, logramos esta misma ordenación, pero de forma continua.

Brans y Mareschal prosiguen su estudio juntos, y es en 1988 cuando proponen el modelo visual interactivo que servirá de apoyo para el método Promethee, denominado GAIA. Este módulo consigue representar gráficamente la metodología propuesta en el método Promethee.

Este método continúa desarrollándose de la mano de ambos autores, hasta la aparición en 1992 del método Promethee V, en el cual se permite la introducción de restricciones. Seguidamente, en 1994, florece el Promethee VI donde la proyección del plano GAIA se conoce como cerebro humano.

#### 3.13.2 Fases del método Promethee

El fundamento del método Promethee versa sobre la obtención de una solución a un problema multiatributo mediante la ordenación clasificatoria de las diversas alternativas disponibles. Pudiendo emplearse tanto para ordenar las alternativas del

modelo desde la mejor a la más débil o como un método de elección si se desean obtener las mejores alternativas del problema.

En nuestro caso las versiones implementadas han sido las correspondientes a la primera generación, es decir, el método Promethee I y II, por ello nos centraremos en comprender el funcionamiento de estos.

En primer lugar, nos interesa conocer la información adicional necesaria para la aplicación de este método. Por un lado, debemos conocer los pesos que reflejarán la importancia relativa de cada uno de los criterios, los pesos han de ser siempre positivos y serán normalizados. De la misma forma debemos contar con información propia de cada criterio, siendo esta relativa a la forma mediante la cual el decisor percibe la escala específica en la que será expresado cada uno de ellos. Esto se conseguirá con la definición de una función de preferencia particular para cada criterio, de la forma  $P_j(\dots, \dots)$  en la que se indica el grado de preferencia asociado a la mejor alternativa en el caso de comparaciones dos a dos, en relación con la desviación entre las diferentes valoraciones de las alternativas para ese criterio.

En los métodos Promethee se realiza la modificación de la modelización de las preferencias del decisor para obtener criterios generalizados que siguen la forma:

$$P_j(a, b) = P_j[d_j(a, b)] \quad \forall a, b \in A$$

donde:

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$$

siendo:

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1$$

El par de ecuaciones anteriores se conoce como criterio generalizado asociado al criterio  $g_j(\cdot)$ .

Para facilitar la elección de las funciones de preferencia comentadas al decisor, Brans, propuso seis formulaciones básicas. Sin embargo, será este quien debe seleccionar la naturaleza del criterio y tras ello asignar los umbrales correspondientes que sean necesarios en cada variante. En el caso de ser conocido el significado económico asociado a cada umbral, puede ser recomendable que tanto el tipo como los umbrales se establezcan en base a estos datos.

Recordemos que las seis funciones de preferencia o filtros comentados son aproximaciones, que la mayoría de las veces resolverán los problemas planteados sobre casos prácticos. Sin embargo, la elección de dicha formulación puede ser otra,

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

y esto deber ser acordado por el decisor siempre ayudado por el analista. Los filtros propuestos para el método Promethee son los siguientes:

### · TIPO I, Criterio Natural:

En la primera figura de la tabla (Ilustración 6) podemos observar, en la zona izquierda, que la diferencia establecida entre a y b resulta negativa, pues  $d_j(a, b) < 0$ . Eso nos indica que la preferencia establecida de a sobre b es nula, con lo que se cumple  $P_j(a, b) = 0$  y  $P_j(b, a) = 1$ .

Si ahora observamos la zona contraria de la figura, tenemos que  $d_j(a, b) > 0$ , o lo que es igual a la preferencia de a sobre b, con lo cual  $P_j(a, b) = 1$  y  $P_j(b, a) = 0$ .

En resumen, tendremos que:

$$\begin{aligned} P_j(d_j) &= 0 & \text{si} & \quad d_j(a, b) = 0 \quad \text{o} \quad d_j(b, a) = 0 \\ P_j(d_j) &= 1 & \text{si} & \quad d_j(a, b) \neq 0 \quad \text{o} \quad d_j(b, a) \neq 0 \end{aligned}$$

Con lo cual, siempre tendremos una alternativa mejor que otra, pues  $P_j(d_j) = P_j(a, b)$  ó  $P_j(d_j) = P_j(b, a)$ .

### · TIPO II, Criterio en U o cuasicriterio:

Como en el tipo anterior, nos apoyamos en este caso en la segunda imagen de la tabla (Ilustración 6) para la comprensión del criterio. En ella podemos ver que ambos lado de la figura son simétricos, esto es así pues representan (a,b) y (b,a).

Para este caso debemos introducir el concepto de umbral de indiferencia, q, que será asignado por el decisor. Con este establecemos lo siguiente:

si  $d_j(a, b) > q$  , entonces  $P_j(a, b) = 1$ ,

si  $d_j(a, b) < -q$  o  $d_j(b, a) > q$  , entonces  $P_j(b, a) = 1$ ,

y si  $d_j(a, b)$  toma valores entre q y -q, entonces no existiría preferencia alguna entre la alternativa a y b.

Con lo cual:

$$\begin{aligned} P_j(d_j) &= 0 & \text{si} & \quad |d_j| \leq q_j \\ P_j(d_j) &= 1 & \text{si} & \quad |d_j| > q_j \end{aligned}$$

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

Esto quiere decir que las alternativas a y b se muestran indiferentes en el intervalo para el cual  $d_j(a, b)$  no pueda superar el umbral  $q_j$ , y para los dos márgenes fuera de dicho intervalo, la preferencia de una alternativa sobre la otra será estricta.

### · TIPO III, Criterio en V o Preferencia Lineal:

En este caso la preferencia de una alternativa frente a otra ya no será estricta, pues como se ve en la ilustración, la fuerza de preferencia entre alternativas va variando en función de la diferencia entre  $f_j(a)$  y  $f_j(b)$ . Ahora el grado de preferencia se incrementará linealmente hasta alcanzar el umbral  $p_j$ , o umbral de preferencia estricta, pues este será el punto de inflexión, establecido por el decisor, a partir del cual una alternativa pasa a tener preferencia estricta sobre la otra.

Matemáticamente tendremos:

$$P_j(d_j) = \frac{d_j}{p_j} \quad \text{si } |d_j| \leq p_j$$
$$P_j(d_j) = 1 \quad \text{si } |d_j| > p_j$$

### · TIPO IV, Criterio en dos niveles o Criterio en escalones:

Si el problema de estudio presenta criterios en los cuales incurramos en evaluaciones que muestren apreciaciones cualitativas, es decir, puedan otorgarse varios niveles de valoración, será interesante emplear este modelo.

Para poder emplear este criterio debemos definir tanto un umbral de indiferencia  $q_j$  como un umbral de preferencia estricta  $p_j$ . Ambos umbrales deben ser definidos por el decisor.

Si la diferencia entre  $f_j(a)$  y  $f_j(b)$  resulta inferior que el valor establecido para el umbral de preferencia, consideraremos ambas alternativas indiferentes entre sí. Por otro lado, si  $d_j(a, b) > q_j$  y  $d_j(a, b) < p_j$ , lo interpretaremos como un grado de preferencia débil. Por último, si  $d_j(a, b) > p_j$ , la preferencia de a sobre b será estricta. Con lo cual, tendremos:

$$P_j(d_j) = 0 \quad \text{si } |d_j| \leq q_j$$
$$P_j(d_j) = \frac{1}{2} \quad \text{si } q_j < |d_j| < p_j$$
$$P_j(d_j) = 1 \quad \text{si } |d_j| \geq p_j$$

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

### · TIPO V. Criterio en V con área interior:

Este modelo se basa en el tipo ya comentado de preferencia lineal, a partir del que introducimos el concepto de zona de inferencia, del cual ya hemos hablado.

Al igual que para el criterio anterior, el decisor debe establecer un umbral de indiferencia,  $q_j$ , y un umbral de preferencia estricta,  $p_j$ , antes de aplicar este criterio.

En este caso, consideraremos indiferente la elección de la alternativa a frente a b si la diferencia calculada entre  $f_j(a)$  y  $f_j(b)$  no alcanza el valor del umbral de indiferencia. Si por el contrario sobrepasa este valor, el grado de preferencia se irá incrementando con  $d_j(a, b)$  hasta alcanzar el umbral de preferencia estricta,  $p_j$ , desde el cual la preferencia de a sobre b será estricta.

Matemáticamente:

$$\begin{aligned} P_j(d_j) &= 0 & \text{si } |d_j| \leq q_j \\ P_j(d_j) &= \frac{|d_j| - q_j}{p_j - q_j} & \text{si } q_j < |d_j| < p_j \\ P_j(d_j) &= 1 & \text{si } |d_j| \geq p_j \end{aligned}$$

### · TIPO VI. Criterio Gaussiano:

Evolucionando dentro de los tipos de aproximaciones posibles para el método Promethee encontramos el Criterio Gaussiano, para el cual el grado de preferencia  $P_j(a, b)$  se incrementará de manera continua en función de la diferencia  $d_j(a, b)$ , ya no de forma lineal, sino siguiendo la expresión:

$$P_j(d_j) = 1 - e^{-\frac{(d_j/s_j)^2}{2}}$$

Con lo que introducimos un nuevo término que el decisor debe definir,  $s_j$ , umbral de preferencia.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

A continuación, se muestra una tabla resumen (Ilustración 6) en la cual se pueden ver las diferentes modalidades de filtros que hemos comentado.

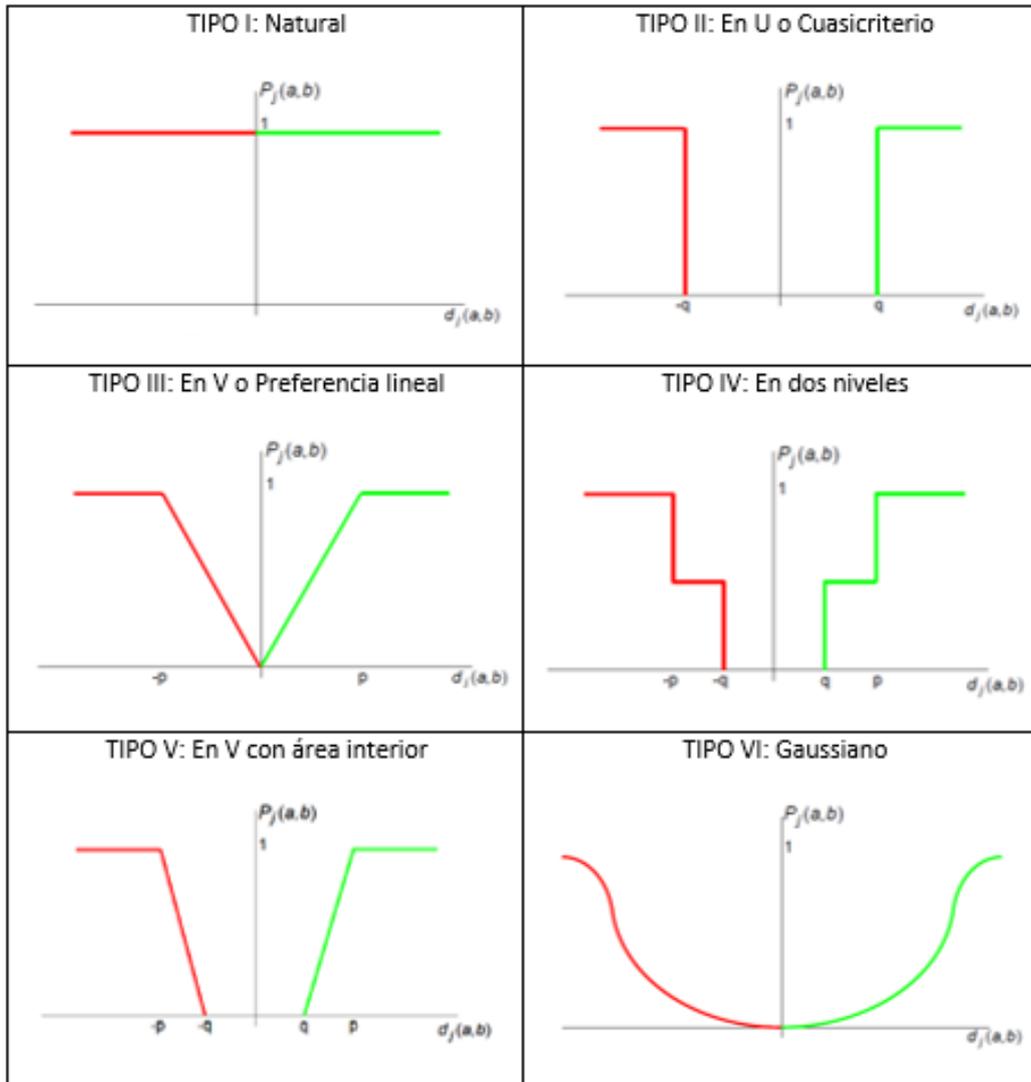


Ilustración 6: Resumen Filtros Promethee

Ahora, mediante las funciones de preferencia comentadas, logramos trasladar las desviaciones observadas en un rango de un criterio concreto, en grados de preferencia que nos permitirán la comparación con independencia de la escala.

En el momento que conocemos la matriz de evaluaciones  $g_j(a_i)$  y han sido definidos, tanto los pesos  $w_j$  como los criterios generalizados asociados  $\{g_j(\cdot), P_j(\cdot, \cdot)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, k$ , puede comenzar el proceso de toma de decisión del método Promethee.

En nuestro caso, nos centraremos en los métodos Promethee I y II, pues han sido los implementados en Microsoft Excel ® en el presente trabajo Fin de Grado.

Recordamos, antes de comenzar con las variantes I y II, que el fundamento del método Promethee, puede tener dos finalidades. Por un lado, se trata de obtener la ordenación jerarquizada de una serie de alternativas definidas para un problema concreto. Este grupo de alternativas se representa mediante la matriz A, en ella quedará ordenadas desde la mejor hasta la más débil. Del mismo modo, este método puede ser usado para la elección de las mejores alternativas de A, si el decisor lo desea. De esta forma se presentan las dos técnicas en las cuales nos centraremos, es decir, así diferenciamos el método Promethee I y II, basándose ambos en un ordenamiento de las alternativas para resolver el problema, pudiendo usar esta ordenación para la obtención de un conjunto de buenas soluciones.

Antes hemos descrito las funciones de preferencia agregada a cada criterio, el siguiente paso trata de definir los índices de preferencia agregada o índices de preferencia multiatributo y los flujos de superación. A continuación, se presenta la forma de obtener estos aspectos.

a) *Índices de preferencia multiatributo,*

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b)w_j$$

donde,  $w_j$ , peso ponderado que indica la importancia relativa del criterio  $g_j(\cdot)$ .

De esta forma, para cada par de alternativas a y b,  $\pi(a,b)$  expresa el grado de preferencia total de a sobre b, siendo esto, la expresión de cómo y con qué grado de intensidad la alternativa a es preferida a la b para todos los atributos. De la misma forma,  $\pi(b,a)$ , revela la preferencia de b sobre a.

Los números deben ser simultáneamente positivos y determinar una Relación de Superación Valorada sobre el conjunto A. Esta relación puede ser representada mediante un Grafo de Superación Valorado, cuyos nodos son las alternativas de A.

Un índice de preferencia multiatributo consta de las siguientes propiedades:

$$\pi(a,a)=0$$

$$0 \leq \pi(a,b) \leq 1 \text{ con } a,b \in A$$

$\pi(a,b) \sim 0$ , implica una preferencia global débil de a sobre b

$\pi(a,b) \sim 1$ , implica una preferencia global fuerte de a sobre b

b) *Flujos de superación,*

También conocido como flujos outranking, en ellos para cada nodo  $a$ , en el grafo de superación valorado, se define el flujo positivo o de salida, como:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a, b)$$

de esta manera podemos medir con qué intensidad la alternativa  $a$  es preferida a las  $(n-1)$  restantes, lo que es lo mismo, obtenemos una medida de carácter de superación o la fuerza de  $a$ .

El flujo negativo queda definido como:

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b, a)$$

que nos indica con qué intensidad otras alternativas son preferidas a la alternativa  $a$ , es decir, la mide la debilidad de  $a$ .

Estos flujos pueden ser representados mediante Grafos Outranking, como los que se muestran a continuación (Ilustración 7, Ilustración 8).

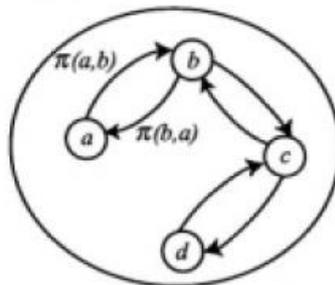


Ilustración 7: Grafo Outranking (Gironés, Madrid, & Valls, 2008)

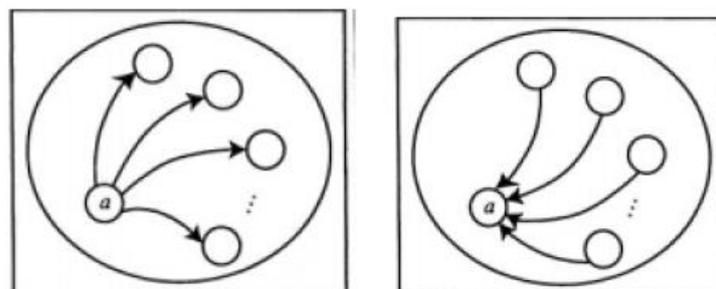


Ilustración 8: Flujos outranking, positivo y negativo (Gironés, Madrid, & Valls, 2008)

Con ello podemos enunciar que una alternativa será mejor que otra cuando mayor sea su flujo positivo y menor sea su flujo negativo. Una vez hemos definido los flujos

de superación, podemos realizar la ordenación parcial correspondiente al método Promethee I.

### 3.13.3 Promethee I: Ordenamiento Parcial

Una vez que son conocidos los flujos de superación, tanto el positivo como el negativo, se deducen dos preordenes de las alternativas, que inusualmente no son idénticos. Mediante la intersección de estas subordinaciones obtenemos el ordenamiento parcial del Promethee I, en este podemos ver reflejada una estructura de preferencias de preorden parcial, de la forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 aP^I b \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) \leq \phi^-(b) \\ \phi^+(a) \geq \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{cases} & P^I, \text{ preferencia de a sobre b} \\
 bP^I a \Leftrightarrow \begin{cases} \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) \geq \phi^-(b) \\ \phi^+(a) \leq \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) > \phi^-(b) \end{cases} & P^I, \text{ preferencia inversa de a sobre b} \\
 aI^I b \Leftrightarrow \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ y } \phi^-(a) = \phi^-(b) & I^I, \text{ indiferencia de a con b} \\
 aR^I b \Leftrightarrow \text{en cualquier otro caso} & R^I, \text{ incomparabilidad de a con b}
 \end{array} \right.$$

Esta preordenación parcial será la solución propuesta al decisor. Debemos tener en cuenta que, usando este método, Promethee I, algunas alternativas siempre permanecerán incomparables. Comúnmente, dos alternativas a y b son incomparables, puesto que los flujos estudiados no revelan información consistente, cuando a es buena bajo un conjunto de criterios para los cuales b es débil, y de forma inversa, b es buena bajo otro conjunto de criterios para los cuales a es débil.

Mediante esta variable del método Promethee no deseamos decidir cuál es la mejor alternativa, sino proporcionar al decisor las mejores opciones o alternativas más fuertes, siendo él quién tome esa decisión.

### 3.13.4 Promethee II: ordenamiento completo

El otro caso propuesto sobre el que nos centramos, radica en proporcionar al decisor una ordenación completa de las alternativas de A, sin incomparabilidades. De este modo, ahora buscamos obtener un preorden completo como estructura de preferencia para alcanzar una decisión. Por ello, emplearemos el flujo de superación neto de cada alternativa, siendo este:

$$\emptyset(a) = \emptyset^+(a) - \emptyset^-(a) \quad a \in A$$

El flujo de superación neto surge del balance entre los flujos de superación positivo y negativo para cada alternativa. Cuanto mayor sea este flujo de superación neto mejor jerarquización obtendrá la alternativa en la ordenación buscada.

Con lo cual, el ordenamiento completo obtenido mediante el método Promethee II, sigue la forma:

$$\begin{cases} aP^{II}b \Leftrightarrow \phi(a) > \phi(b) \\ aI^{II}b \Leftrightarrow \phi(a) = \phi(b) \end{cases}$$

Ahora todas las alternativas del conjunto A son comparables, pues hemos podido ordenarle. Sin embargo, la información obtenida es menos precisa y puede llegar a ser cuestionada, pues se pierde gran parte de la misma al efectuar el balance entre flujos de entrada y salida.

Como conclusión, podemos decir que tanto el Promethee I como el II, proporcionan al decisor una herramienta mediante la cual este podrá seleccionar una buena solución al problema plantado, con una clara visión de las relaciones de superación entre las alternativas completada mediante grafos de superación.

### 3.13.5 Plano GAIA

Como proceso de apoyo al método Promethee, en 1988, Brans y Marschal desarrollan el procedimiento GAIA, mediante el cual obtenemos un módulo de interacción visual complementario.

El plano GAIA facilita mediante la descripción gráfica del problema planteado tomar una decisión, haciendo hincapié en los conflictos existentes entre los criterios y su relevancia por medio de los pesos ponderados en la decisión final. Esto lo consigue mediante el empleo de flujos netos unicriterio obtenidos por la disgregación del flujo neto global antes calculado.

Por otro lado, para representar el problema en un plano, puesto que el número de atributos excede a las componentes que pueden ser expresadas, deberemos proyectar la información incluida en el espacio k-dimensional sobre el mismo. Para ello empleamos el Análisis de Componentes Principales, según el cual el método GAIA trata de proyectar la información obtenida en un plano. Para obtener dicho plano han de ser proyectados los puntos que representan a las alternativas, mientras que los criterios serán representados mediante vectores unitarios de los ejes de coordenadas.

## | FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS

Podemos afirmar que, con la proyección estudiada, plano GAIA, se conserva la mayor cantidad de información respecto a la nube de puntos. Por lo cual por medio de este análisis lograremos distinguir qué alternativas son buenas bajo un criterio particular, ya que estas tendrán la misma orientación respecto al atributo sobre el plano. En el caso de observar ejes con orientaciones similares comprobaremos que los criterios a los cuales representan muestran preferencias afines, mientras que, en caso contrario, ejes con direcciones opuestas, representan a criterios enfrentados entre sí. También observaremos la longitud de cada eje pues esto constituye una medida sobre el poder de discriminación relativo de los criterios respecto al conjunto de alternativas de A.

Finalmente, si evaluamos la calidad de la información representada, vemos que esta se muestra directamente relacionada con el porcentaje  $\delta$ , que nos indica la cantidad de información que logramos conservar después de realizar la proyección del plano. Normalmente, en los casos prácticos que podemos encontrar  $\delta$  es superior al 70%, lo cual significa que el plano GAIA representa de manera fiel los problemas de decisión planteados, sin embargo, se recomienda una posición conservadora frente a las posibles conclusiones a extraer del método.

En conclusión, podemos destacar como principales ventajas que nos ofrece el plano GAIA, la claridad y sencillez para reconocer en los atributos, su poder de discriminación, así como, los aspectos más conflictivos que presentan, y en el caso de las alternativas el aspecto más destacable que nos muestra el plano GAIA radica en la calidad sobre los diferentes criterios que es conservada. Siendo la principal ventaja del plano GAIA frente a los métodos Promethee I y II, radica en que mientras estos tienen una base prescriptiva, este es descriptivo y gráfico.



## 4 MANUAL DE PROGRAMADOR

Puesto que a lo largo del presente Trabajo Fin de Grado ya han sido comentados los aspectos matemáticos de los métodos implementados en Microsoft Excel®, este capítulo se dedicará a la modelización realizada a partir de dichos conocimientos. Es decir, ahora trataremos de comentar cada uno de los pasos desarrollados de manera descriptiva, desde la entrada de datos, hasta la solución propuesta al decisor, para cada una de las metodologías.

Este capítulo está dedicado principalmente a personas con cierto conocimiento de la herramienta Microsoft Excel®, dado que en él se mostrarán formulaciones propias de este software.

### 4.1 Matriz de decisión

Al abrir el fichero en la primera hoja del programa, nombrada como *Datos*, puede verse la matriz (Ilustración 13) en la cual el usuario deberá introducir los datos del problema. Dicha matriz servirá como base para codificar las siguientes páginas.

En ella el usuario introducirá las alternativas y criterios sobre cuyas valoraciones operaremos. El número tanto de alternativas como criterios introducidos es variable, aunque como mínimo deben establecerse dos, pues estamos ante un proceso de valoración multicriterio, y el máximo para el cual está diseñado el programa serán 15 criterios y 10 alternativas.

Para los criterios el decisor deberá indicar si se trata de un criterio creciente o decreciente, por ello se ha habilitado una lista desplegable con ambas alternativas. Dicha lista ha sido generada mediante el comando validación de datos y en una hoja oculta, *Anexo*, podemos configurar las opciones de dicha lista.

| MATRIZ DE DECISIÓN |  |            |            |            |            |
|--------------------|--|------------|------------|------------|------------|
|                    | Criterio 1   | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 |
| VALORACIÓN         | Decreciente  | Creciente  | Creciente  | Creciente  | Creciente  |
|                    | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">                     Creciente<br/>                     Decreciente                 </div> |            |            |            |            |
| Alternativa 1      |  |            |            |            |            |
| Alternativa 2      |  |            |            |            |            |
| Alternativa 3      |  |            |            |            |            |

Ilustración 9: Lista desplegable de criterios

Del mismo modo, habilitamos una lista desplegable al final de la elección de criterios, en la cual se muestran las posibilidades de transformación en crecientes de todos los criterios.



Ilustración 10: Transformación de criterios

Para que el usuario pueda acceder a la hoja en la que debe elegir el método según el cual desea implementar el problema, insertaremos un enlace a la misma mediante el comando hipervínculo. El usuario deberá pulsar en la siguiente flecha (Ilustración 11) para acceder a la hoja de selección de metodología.



Ilustración 11: Elección de Método

A lo largo del presente Trabajo Fin de Grado, con el fin de esclarecer la implementación llevada a cabo para cada uno de los métodos expuesto, nos apoyaremos en el siguiente ejemplo, del cual tomaremos los datos. Simplificaremos la matriz, estableciendo ocho criterios y seis alternativas, para facilitar la visualización de las ilustraciones a lo largo del documento.

**MATRIZ DE DECISIÓN**

|               | Criterio 1  | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7  | Criterio 8  |
|---------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| VALORACIÓN    | Decreciente | Creciente  | Creciente  | Creciente  | Creciente  | Creciente  | Decreciente | Decreciente |
| Alternativa 1 | 2           | 4          | 75         | 3          | 25,5       | 20         | 1           | 450         |
| Alternativa 2 | 2           | 4          | 75         | 3          | 25,5       | 20         | 1           | 450         |
| Alternativa 3 | 2           | 3          | 100        | 4          | 19,5       | 25         | 1,4         | 300         |
| Alternativa 4 | 1           | 7          | 50         | 2          | 22         | 27         | 0,7         | 450         |
| Alternativa 5 | 4           | 0,2        | 70         | 2          | 25,5       | 22         | 1,5         | 700         |
| Alternativa 6 | 3           | 3          | 80         | 3          | 20,4       | 6          | 0,7         | 500         |

Ilustración 12: Ejemplo aplicado

|                |  | <b>MATRIZ DE DECISIÓN</b> |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
|----------------|--|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
|                |  | Criterio 1<br>Decreciente | Criterio 2<br>Creciente | Criterio 3<br>Creciente | Criterio 4<br>Creciente | Criterio 5<br>Creciente | Criterio 6<br>Creciente | Criterio 7<br>Decreciente | Criterio 8<br>Decreciente | Criterio 9<br>Decreciente | Criterio 10<br>Creciente | Criterio 11<br>Creciente | Criterio 12<br>Creciente | Criterio 13<br>Creciente | Criterio 14<br>Creciente | Criterio 15<br>Decreciente |  |
| VALORACIÓN     |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 1  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 2  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 3  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 4  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 5  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 6  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 7  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 8  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 9  |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |
| Alternativa 10 |  |                           |                         |                         |                         |                         |                         |                           |                           |                           |                          |                          |                          |                          |                          |                            |  |

Ilustración 13: Matriz de Decisión

## 4.2 Normalización

Ha sido reservada una hoja dentro del documento con el fin de realizar tanto las conversiones de los criterios, para que todos se muestren la misma línea, en este caso hacer todos ellos crecientes, como para realizar los cuatro tipos de normalizaciones comentadas anteriormente.

### 4.2.1 Transformación de criterios

Si comenzamos con la conversión de los criterios, transformando todos ellos en crecientes, podemos ver que ya en la hoja *Datos*, el usuario debe seleccionar entre dos posibles métodos.

En primer lugar, podemos realizar la transformación de aquellos criterios que el usuario ha caracterizado como decrecientes en crecientes según el cálculo del inverso de dato proporcionado. Conseguiremos esta conversión dividiendo la unidad entre el valor dado en cada caso.

La segunda forma de conseguir que todos los atributos puedan ser caracterizados como crecientes se obtendrá mediante el cambio de signo del dato introducido en el programa. Este procedimiento es tan sencillo como el anterior, pues se trata de introducir un signo menos, haciendo el dato introducido negativo en el caso de que el atributo al cual se corresponda sea decreciente.

### 4.2.2 Tipos de normalización

Ahora pasamos a desarrollar la forma mediante la cual han sido implementados los cuatro tipos de normalizaciones disponibles, para elección del usuario, en el caso de que el método seleccionado requiera este paso.

#### · Normalización según %Máximo:

Este procedimiento se basa en la fracción de cada dato aportado al problema entre el máximo valor establecido dentro de su criterio correspondiente, lo cual logramos implementar en Microsoft Excel ® mediante la siguiente formulación.

$$\text{SI}(\mathbf{1}="" ; "" ; \text{SI}(\mathbf{Y}(\mathbf{2}="" \text{Decreciente}"" ; \mathbf{3}="" \text{Cambio de signo}"" ) ; (\mathbf{1} / \text{ABS}(\text{MIN}(\mathbf{4}))) + 1 ; \mathbf{1} / \text{SI}(\text{ABS}(\text{MAX}(\mathbf{4})) > \text{ABS}(\text{MIN}(\mathbf{4})) ; \text{ABS}(\text{MAX}(\mathbf{4})) ; (\text{MIN}(\mathbf{4}))))$$

donde:

(1) Dato de la matriz

- (2) Valoración del criterio
- (3) Tipo de transformación a realizar
- (4) Rango de datos del criterio

· Normalización según %Total:

Esta modalidad es semejante a la anterior, sin embargo, la división se realizará entre la suma de todos los valores asignados al criterio que es evaluado en esa celda.

$$SI(1="";";SI(Y(3="Cambio de signo";2="Decreciente");(1+1/ABS(SUMA(4)))/(CONTAR(4)-1);1/SUMA(4)))$$

donde:

- (1) Dato de la matriz
- (2) Valoración del criterio
- (3) Tipo de transformación a realizar
- (4) Rango de datos del criterio

· Normalización según %Rango:

Para alcanzar la normalización entre caso realizaremos la fracción entre la diferencia de la valoración de cada alternativa para un criterio menos el valor mínimo alcanzado por las valoraciones en ese criterio, entre la máxima diferencia entre todas las estimaciones dadas. Que al implementarlo en cada celda de la matriz obtenemos:

$$SI(1="";";(1-SI(MIN(2)<>0;MIN(2);K.ESIMO.MENOR(2;CONTAR.SI(2;"=0")+1)))/(MAX(2)-SI(MIN(2)<>0;MIN(2);K.ESIMO.MENOR(2;CONTAR.SI(2;"=0")+1))))$$

donde:

- (1) Dato de la matriz ya transformado en creciente
- (2) Rango de datos del criterio transformado

· Normalización según Vector Unitario:

El último de los procedimientos de normalización de los datos proporcionados se basa en el Vector Unitario, el cual podemos calcular dividiendo cada dato de la matriz entre el módulo generado por todas las valoraciones dadas para un criterio.

$$\text{SI}(1="" ; "" ; \text{SI}(Y(3="" \text{Cambio de signo} ; 2="" \text{Decreciente})); \\ 1+1/\text{RAIZ}(\text{SUMA.CUADRADOS}(4)); 1/\text{RAIZ}(\text{SUMA.CUADRADOS}(4))))$$

donde:

- (1) Dato de la matriz
- (2) Valoración del criterio
- (3) Tipo de transformación a realizar
- (4) Rango de datos del criterio

### 4.3 Dominancia

El primero de los métodos implementados se encuentra en la hoja *Dominancia*. En este hemos realizado la comparación entre pares de alternativas con sus valores ya normalizados, que nos indicarán las relaciones de dominancia, de la siguiente forma:

· Si la casilla ocupa la diagonal de la matriz, es decir, estamos comparando una matriz consigo misma, o si no existe alternativa correspondiente a esa línea, aparece la casilla en blanco.

· Si la suma de todos los criterios para las dos alternativas comparadas da el mismo resultado, la respuesta será “NO”. Esto indica que no existe relación de dominancia entre ambas alternativas.

· Si todos los valores de la alternativa de la columna horizontal (por la que debemos empezar a leer la matriz siempre) son inferiores a los de la alternativa correspondiente de la fila codificada en la casilla seleccionada, tenemos que la alternativa de la columna es dominada por la alternativa de la fila. De esta forma en la casilla estudiada aparecerá el texto “DOMINADA”.

A continuación, podemos ver un ejemplo de cómo se leerá la matriz (Ilustración 14).

|               | CONCORDANCIA | Alternativa 1 | Alternativa 2   | Alternativa 3 |
|---------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| Alternativa 1 |              |               |                 |               |
| Alternativa 2 |              |               |                 |               |
| Alternativa 3 |              |               | Celda analizada |               |

Ilustración 14: Lectura de matriz

· En cualquier otro caso, la respuesta será “NO”.

Al implementar esto en cada celda de la matriz de comparación de alternativas tenemos la siguiente formulación:

$SI(O(1="" ; 2="" ; 2=1) ; "" ; SI(SUMA(3)=SUMA(4) ; "NO" ; SI(Y(5 \leq 6 ; \dots ; 7 \leq 8) ; "DOMINADA" ; "NO")))$

donde:

- (1) Alternativa de referencia en la columna
- (2) Alternativa de referencia en la fila
- (3) Rango de datos de la alternativa (1)
- (4) Rango de datos de la alternativa (2)
- (5) Valoración normalizada de la Alternativa (1) en el Criterio 1
- (6) Valoración normalizada de la Alternativa (2) en el Criterio 1
- (7) Valoración normalizada de la Alternativa (1) en el último criterio
- (8) Valoración normalizada de la Alternativa (2) en el último criterio

A continuación, podemos ver un ejemplo de lo explicado (Ilustración 15):

|               | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 |               | NO            | NO            | NO            | NO            | NO            |  |
| Alternativa 2 | DOMINADA      |               | NO            | NO            | NO            | NO            |  |
| Alternativa 3 | NO            | NO            |               | NO            | NO            | NO            |  |
| Alternativa 4 | NO            | NO            | NO            |               | NO            | NO            |  |
| Alternativa 5 | NO            | NO            | NO            | NO            |               | NO            |  |
| Alternativa 6 | NO            | NO            | NO            | NO            | NO            |               |  |

Ilustración 15: Ejemplo Dominancia, Comparación de alternativas

Podemos ver como la Alternativa 2 es dominada por la 1, del mismo modo, las casillas diagonales aparecen en blanco, así como aquellas en las cuales no existe alternativa a comparar.

Una vez hemos obtenido las relaciones entre pares de alternativas, debemos conocer aquellas que no resultarán válidas como soluciones a nuestro problema, pues el hecho de que hayan resultado dominadas por otra indica que su valoración ha sido peor en todos los criterios.

Para conocer las alternativas que resultarán finalmente válidas, operamos empleando la matriz anterior del siguiente modo.

Mediante el empleo de la función CONTAR.SI(Rango; Criterio), identificaremos el Rango como la fila correspondiente a cada alternativa y el criterio será que aparezca la palabra Dominada. De esta forma, si el resultado de esta función es mayor que cero, alguna alternativa domina a la estudiada, por lo que esta alternativa no podrá ser solución a nuestro problema.

Si vemos en nuestro ejemplo:

| DOMINANTES    |
|---------------|
| Alternativa 1 |
|               |
| Alternativa 3 |
| Alternativa 4 |
| Alternativa 5 |
| Alternativa 6 |
|               |

Ilustración 16: Ejemplo Dominancia, Solución

La Alternativa 2 ha sido eliminada, pues es dominada por la alternativa 1. Las demás alternativas serán válidas como solución, pues no han resultado dominadas por ninguna otra.

#### 4.4 Max-Min

En la hoja *MAX-MIN* ha sido llevada a cabo la implementación de dicho método, en el cual lo primero que el decisor debe elegir será la forma por la que se van a normalizar los datos. Para ello el decisor deberá seleccionar en la lista desplegable habilitada una de las cuatro opciones. Esta lista desplegable ha sido construida mediante el comando Validación de Datos.

| MAX-MIN                 |            |            |         |         |
|-------------------------|------------|------------|---------|---------|
| Método de normalización |            | % MAX      |         |         |
|                         | Criterio 1 | % MAX      | % TOTAL | % RANGO |
| Alternativa 1           | 0,5        | 0,57142857 | 0,75    | 0,75    |
| Alternativa 2           | 0,5        | 0,57142857 | 0,75    | 0,75    |

Ilustración 17: Normalización Max-Min

Una vez que hemos fijado el método de normalización por el cual vamos a realizar la implementación del método, representamos en la matriz Criterios-Alternativas, los valores calculados para dicha normalización en la hoja *Normalización*. Por ello cada celda de dicha matriz ha sido programada según:

$SI(1=" \%MAX";2;SI(1=" \%TOTAL";3;SI(1=" \%RANGO";4;SI(1=" Vector Unitario";5;""))))$

donde:

- (1) Celda de elección de normalización
- (2) Dato normalizado según %MAX
- (3) Dato normalizado según %TOTAL
- (4) Dato normalizado según %RANGO
- (5) Dato normalizado según Vector Unitario

De esta matriz nos interesa el extraer el valor correspondiente con el máximo de los mínimos para cada alternativa. Para conocer este valor aplicamos la siguiente formulación en una celda anexa:

$MAX(SI(1="";-10000;MIN(2));SI(3="";-10000;MIN(4));...)$

donde:

- (1) Nombre de la Alternativa 1
- (2) Rango de la Alternativa 1 para todos los criterios
- (3) Nombre de la Alternativa 2
- (4) Rango de la Alternativa 2 para todos los criterios

Como penalización de los valores en los cuales no tenemos dato, por no existir alternativa o criterio introducimos la cantidad de -1000.

Evaluando dicha formulación en todas las alternativas obtenemos como respuesta final el valor alcanzado por el máximo de los mínimos relativos de cada alternativa. Aquellas alternativas para para las cuales en algunos de sus criterios hayan obtenido una valoración igual a la dada en la celda comentada serán válidas para su selección por el decisor.

Aplicado lo comentado sobre este método al ejemplo expuesto tenemos lo siguiente. Si elegimos como método de normalización por ejemplo %Max, la matriz obtenida es la siguiente (Ilustración 18):

|               | Criterio 1 | Criterio 2  | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|---------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Alternativa 1 | 0,5        | 0,571428571 | 0,75       | 0,75       | 1          | 0,74074074 | 0,7        | 0,66666667 |  |
| Alternativa 2 | 0,5        | 0,571428571 | 0,75       | 0,75       | 1          | 0,74074074 | 0,7        | 0,66666667 |  |
| Alternativa 3 | 0,5        | 0,428571429 | 1          | 1          | 0,76470588 | 0,92592593 | 0,5        | 1          |  |
| Alternativa 4 | 1          | 1           | 0,5        | 0,5        | 0,8627451  | 1          | 1          | 0,66666667 |  |
| Alternativa 5 | 0,25       | 0,028571429 | 0,7        | 0,5        | 1          | 0,81481481 | 0,46666667 | 0,42857143 |  |
| Alternativa 6 | 0,33333333 | 0,428571429 | 0,8        | 0,75       | 0,8        | 0,22222222 | 1          | 0,6        |  |

Ilustración 18: Ejemplo Max-Min, Normalización

Como podemos ver los valores marcados (amarillo) representan el mínimo de cada alternativa. De estos valores nos interesa el máximo de estos mínimos, pues la alternativa o alternativas que cuenten con dicho valor serán las que presentaremos al decisor como mejores alternativas al problema planteado. En este caso, el máximo de dichos mínimos encontrados se corresponde con el valor 0,5 y está presente en las alternativas 1, 2 y 4.

| Valor | MAX |
|-------|-----|
|       | MIN |
| 0,5   |     |

| MAX-MIN       |
|---------------|
| Alternativa 1 |
| Alternativa 2 |
| Alternativa 4 |

Ilustración 19: Ejemplo Max-Min, Solución

#### 4.5 Max-Max

En este método operamos de igual manera que en el método anterior, sin embargo, ahora los valores seleccionados no serán los mínimos de cada alternativa, sino los máximos, por lo que buscamos el máximo de los máximos de la matriz.

La forma de seleccionar el tipo de normalización se basa en una lista desplegable, con las cuatro opciones disponibles.



Ilustración 20: Elección de Normalización método Max-Max

Si lo aplicamos directamente al ejemplo, pues el proceso es similar al método anterior, tenemos que la matriz generada para el método %Total es la siguiente (Ilustración 21):

|               | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Alternativa 1 | 0,162162162 | 0,188679245 | 0,166666667 | 0,176470588 | 0,184248555 | 0,166666667 | 0,160305344 | 0,165484634 |  |
| Alternativa 2 | 0,162162162 | 0,188679245 | 0,166666667 | 0,176470588 | 0,184248555 | 0,166666667 | 0,160305344 | 0,165484634 |  |
| Alternativa 3 | 0,162162162 | 0,141509434 | 0,222222222 | 0,235294118 | 0,140895954 | 0,208333333 | 0,114503817 | 0,24822695  |  |
| Alternativa 4 | 0,324324324 | 0,330188679 | 0,111111111 | 0,117647059 | 0,158959538 | 0,225       | 0,229007634 | 0,165484634 |  |
| Alternativa 5 | 0,081081081 | 0,009433962 | 0,155555556 | 0,117647059 | 0,184248555 | 0,183333333 | 0,106870229 | 0,106382979 |  |
| Alternativa 6 | 0,108108108 | 0,141509434 | 0,177777778 | 0,176470588 | 0,147398844 | 0,05        | 0,229007634 | 0,14893617  |  |

Ilustración 21: Ejemplo Max-Max, Normalización

En ella podemos ver que los valores señalados se corresponden con los máximos de cada alternativa. El valor máximo de estos máximos nos indica la alternativa o alternativas que mejor resuelven el problema planteado según los datos aportados por el usuario. En este caso el valor máximo es 0,330188679 que se corresponde únicamente con la Alternativa 4.

|                  |               |
|------------------|---------------|
| Valor<br>MAX-MAX | MAX-MAX       |
| 0,33018868       |               |
|                  |               |
|                  |               |
|                  | Alternativa 4 |
|                  |               |
|                  |               |

Ilustración 22: Ejemplo Max-Max, Solución

#### 4.6 Conjunto

En este método, hoja *Conjuntivo*, operaremos con los valores introducidos directamente por el usuario, pues no es necesario normalizar. Sin embargo, debemos establecer un umbral mínimo de superación para cada criterio.

Evaluaremos si la valoración dada para una alternativa en un criterio concreto es válida, es decir alcanza al menos el valor mínimo establecido para dicho criterio. Para ello simplemente comparamos el valor de la matriz de decisión en cada celda con el valor mínimo establecido para cada criterio. Comprobamos esto mediante la siguiente fórmula programada en cada celda.

`SI(1="";"";SI(2="";"";SI(3="creciente";SI(4>=5;"SI";"");SI(4<=5;"SI";""))))`

donde:

- (1) Alternativa de referencia en la columna
- (2) Criterio de referencia en la fila
- (3) Celda de selección para criterio creciente o decreciente
- (4) Valor de la celda correspondiente con la Alternativa (1) en el Criterio (2)
- (5) Umbral establecido para el Criterio (2)

Como vemos debemos contemplar dos opciones, que programamos mediante un bucle SI(Condición verdadera, Hago esto, Hago lo otro) anidado. Pues si el criterio es creciente, nos interesarán valores mayores que el establecido como mínimo para dicho atributo. Sin embargo, si el criterio ha sido clasificado como decreciente, estamos ante el caso contrario, los valores aceptables serán aquellos que se encuentren por debajo de la valoración establecida como aceptable para el atributo. La matriz responderá "SI" para aquellos atributos en los cuales la alternativa cumpla con el criterio analizado, en cualquier otro caso la casilla estará en blanco.

Una vez realizado el análisis anterior, podemos definir qué alternativas dan solución a nuestro problema. Para que una alternativa pueda resultar válida según este método debe superar el umbral establecido en todos los criterios. Para comprobar esto empleamos la siguiente formulación, dentro de un bucle CONTARA(Rango fila de una alternativa de la Matriz de datos)=CONTAR.SI(Rango fila de una alternativa de la matriz del método; "SI"), entonces está alternativa supera los límites en todos los criterios, en caso contrario la alternativa no es válida y se muestra la celda vacía.

Al lado de esta columna, que representa las alternativas aceptables, tenemos otra análoga donde se muestran las alternativas que no lo son, codificada mediante un bucle SI.

Si aplicamos lo anterior al ejemplo de referencia tenemos, en primer lugar, reservamos un apartado para que el usuario pueda introducir los umbrales de los criterios. Con ello podremos crear una matriz en la cual se valoran los criterios en cada alternativa y a continuación, dos columnas con la decisión final propuesta.

|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| PESOS         | 4          | 1          | 100        | 3          | 1          | 15         | 1,4        | 1000       |  |
|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
| Alternativa 1 | SI         | SI         |            | SI         | SI         | SI         | SI         | SI         |  |
| Alternativa 2 | SI         | SI         |            |            | SI         | SI         | SI         | SI         |  |
| Alternativa 3 | SI         |  |
| Alternativa 4 | SI         | SI         |            |            | SI         | SI         | SI         | SI         |  |
| Alternativa 5 | SI         |            |            |            | SI         | SI         |            | SI         |  |
| Alternativa 6 | SI         | SI         |            | SI         | SI         |            | SI         | SI         |  |
|               |            |            |            |            |            |            |            |            |  |

Ilustración 23: Ejemplo Conjuntivo, Umbrales y valoración de alternativas

| ACEPTABLES | NO ACEPTABLES |
|------------|---------------|
|            | SI            |
|            | SI            |
| SI         |               |
|            | SI            |
|            | SI            |
|            | SI            |
|            |               |

Ilustración 24: Ejemplo Conjuntivo, Solución

Como podemos observar que sólo la Alternativa 3 resulta válida, pues es la única que alcanza los umbrales de referencia para todos los criterios. En este caso, la solución final que debe tomar el decisor es la representada por la Alternativa 3.

#### 4.7 Disyuntivo

Este método, aunque se ha representado en otra hoja, denominada *Disyuntivo*, emplea el mismo principio que el anterior, por lo que aprovecharemos lo explicado sobre la matriz principal del punto anterior. Sin embargo, a la hora de elegir las alternativas válidas según está sistemática tenemos que darán solución al problema de estudio todas aquellas que superen el umbral establecido para al menos un criterio. Esto implica que todas las alternativas que cuenten con un criterio dentro de una valoración considerada razonable por el decisor podrán dar resultado al problema planteado.

Trasladando esto al ejemplo de estudio tenemos:

|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| PESOS         | 2          | 100        | 100        | 20         | 24         | 15         | 0,6        | 300        |  |
|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
| Alternativa 1 | SI         |            |            |            | SI         | SI         |            |            |  |
| Alternativa 2 | SI         |            |            |            | SI         | SI         |            |            |  |
| Alternativa 3 | SI         |            | SI         |            |            | SI         |            | SI         |  |
| Alternativa 4 | SI         |            |            |            |            | SI         |            |            |  |
| Alternativa 5 |            |            |            |            | SI         | SI         |            |            |  |
| Alternativa 6 |            |            |            |            |            |            |            |            |  |

Ilustración 25: Ejemplo Disyuntivo, Umbrales y valoración de alternativas

| ACEPTABLES | NO ACEPTABLES |
|------------|---------------|
| SI         |               |
|            | SI            |
|            |               |

Ilustración 26: Ejemplo Disyuntivo, Solución

Podemos observar (Ilustración 26) como la única alternativa que no alcanza los valores esperados es la Alternativa 6, por lo cual es la única que no podrá ser resultado del problema implementado.

#### 4.8 Lexicográfico

En la hoja *Lexicográfico* podemos encontrar el siguiente de los métodos multiatributo implementados. Este método se engloba dentro de las sistemáticas ordinales, es decir, en este caso debemos conocer la jerarquía de cada uno de los criterios, para posteriormente ordenarlos.

La jerarquización en este tipo de métodos se realiza mediante la atribución de pesos a los criterios establecidos. Para poder introducir estos pesos ha sido reservada una fila en la cual el usuario debe introducir la importancia de los criterios con valores numéricos. El usuario otorgará un valor positivo por cada peso, siendo el valor más alto para el criterio que considere más importante y disminuyendo según se reduzca el grado de importancia de los criterios. Dicha numeración puede no ser correlativa, pero dos criterios no pueden obtener la misma valoración.

Una vez que el usuario nos ha proporcionado información sobre la preferencia de los criterios, procedemos a su ordenación en la matriz sobre la que implementaremos el método. Este paso le realizaremos apoyándonos en las funciones de Microsoft Excel ®: JERARQUIA.EQV(Dato dentro del rango; Rango) y CONTAR.SI(Rango; Condición). La formulación empleada evalúa la importancia de cada criterio según el bucle anidado para cada criterio:

$$\text{SI}(\text{JERARQUIA.EQV}(1; 2) = \text{CONTAR.SI}(1; "=0") + 1; 3)$$

donde:

- (1) Peso del criterio evaluado
- (2) Rango de pesos
- (3) Criterio de mayor importancia de entre los que no han sido asignados

El término remarcado en **naranja**, irá variando en función de la importancia dada a cada criterio, de modo que para el criterio más relevante será 1, para la celda anexa por la derecha donde ubicaremos el segundo criterio más importante será un 2, y así sucesivamente, hasta configurar los 15 posibles criterios.

Dado que ya hemos conseguido ordenar los criterios según el orden de preferencia de usuario, ahora podemos generar la matriz sobre la que operaremos para obtener la ordenación de las alternativas final.

Esta nueva matriz se nutre, por medio de la ordenación establecida y la lista de alternativas conocidas, de los datos obtenidos después de la conversión para hacer todos los criterios crecientes. Es decir, en la primera columna de la matriz tendremos los datos de todas las alternativas para el criterio más valorado por el decisor, en la segunda los datos sobre el segundo criterio más valorado, así respectivamente hasta llegar a la última columna. La construcción de esta matriz se basa en:

$$\text{SI}(1="";SI(2=3;6;SI(2=4;7;...;SI(2=5;8;""))))))))))))))$$

Donde:

- (1) Alternativa de referencia en la columna
- (2) Criterio de referencia en la fila ordenada según la jerarquización de pesos
- (3) Criterio 1 en la hoja *Datos*
- (4) Criterio 2 en la hoja *Datos*
- (5) Criterio 15 en la hoja *Datos*

- (6) Valor de la Alternativa (1) en el Criterio 1
- (7) Valor de la Alternativa (1) en el Criterio 2
- (8) Valor de la Alternativa (1) en el Criterio 15

En este método emplearemos dos columnas anexas. En la primera de ellas tendremos la suma total de los datos de cada alternativa, esta columna únicamente entra en juego en casos de empate. A partir de esta suma y volviendo a aplicar JERARQUIA.EQV, construimos otra columna de apoyo. En esta columna tendremos la suma de la posición relativa de cada alternativa en base a cada criterio, ponderando los criterios según orden de relevancia. De esta forma la alternativa que alcance mayor valoración para el criterio más relevante será la que mayor puntuación obtenga, a partir de la jerarquización realizada, la siguiente será la segunda mejor clasificada por el decisor según el criterio más importante, y así sucesivamente.

Gracias a este anexo, oculto para el usuario, resolvemos posibles empates en valoraciones de alternativas para un criterio. Pues, aunque varias alternativas puedan resultar semejantes para uno o más criterios, en el momento que en un atributo dichos valores difieran, las alternativas que hasta ese momento resultaban empatadas en su ordenación, obtendrán diferentes valoraciones numéricas a la hora de realizar este sumatorio final.

Si dos o más alternativas obtienen las mismas valoraciones en todos los criterios, objetivamente será indiferente la elección final entre ellas, pero con el fin de conseguir que la implementación realizada resulte más visual, en la columna de ordenación final de las alternativas posicionaremos mejor aquella alternativa que antes encontremos en la lista si comenzamos leyendo esta desde su parte superior. Esto lo conseguimos introduciendo en la segunda columna de apoyo la función CONTAR.SI dentro de un bucle SI. Ante un empate total de varias alternativas, con la función CONTAR.SI iremos “leyendo” las veces que se ha repetido la misma suma dentro de la lista de posibles alternativas. De esta manera como en la primera fila solo analizamos la lectura de la primera suma de la columna, en el caso de que esta primera alternativa se encuentre empatada al final con alguna otra, esta se posicionará más arriba en la jerarquización final, pues gracias a dicha función SI, en caso de encontrar empate, restaremos  $0,001x$ ” El número de veces que aparece repetido ese valor hasta la lectura de esa fila”, proporcionado para este valor la resta de 0,001. Así los sucesivos empates con esta alternativa irán restando 0,002, 0,003... aumentando esta cifra tantas veces como se repita el empate.

Con lo comentado, formamos la columna de Ordenación Final, en la cual se presenta la jerarquización de alternativas desde la que mejor se adapte a las restricciones impuestas por el usuario hasta la menos recomendada. Para esta columna volvemos a aplicar la función K.ESIMO.MAYOR(Matriz; k), dentro de un bucle

Si, donde k representa la posición jerarquizada de la alternativa que buscamos e irá desde 1 a 10, evaluando la posición de todas las alternativas posibles.

Si llevamos lo explicado al ejemplo tenemos:

En primer lugar, el apartado donde el usuario debe introducir los pesos según los cuales realizaremos la ordenación de los criterios.

Una vez conocidos esos pesos, generamos la matriz con los datos del usuario. Como podemos observar en la siguiente tabla (Ilustración 27), el Criterio 2 es el que contiene el peso con el valor más alto, o lo que es lo mismo, este atributo será el mejor valorado por el decisor, por lo cual le colocamos en primer lugar en nuestra matriz. Realizamos esto sucesivamente con el Criterio 7, Criterio 6 ... hasta llegar al Criterio 1, que es el que ha obtenido peor valoración.

Con esto, asignamos a cada columna los datos correspondientes a la posición de cruce entre cada alternativa y criterio respectivamente. De esta forma en el ejemplo obtenemos la siguiente matriz:

|       | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| PESOS | 1          | 8          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 2          |  |

|               | Criterio 2 | Criterio 7 | Criterio 6 | Criterio 5 | Criterio 4 | Criterio 3 | Criterio 8 | Criterio 1 |  |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Alternativa 1 | 4          | -1         | 20         | 25,5       | 3          | 75         | -450       | -2         |  |
| Alternativa 2 | 4          | -1         | 20         | 25,5       | 3          | 75         | -450       | -2         |  |
| Alternativa 3 | 3          | -1,4       | 25         | 19,5       | 4          | 100        | -300       | -2         |  |
| Alternativa 4 | 7          | -0,7       | 27         | 22         | 2          | 50         | -450       | -1         |  |
| Alternativa 5 | 0,2        | -1,5       | 22         | 25,5       | 2          | 70         | -700       | -4         |  |
| Alternativa 6 | 3          | -0,7       | 6          | 20,4       | 3          | 80         | -500       | -3         |  |

Ilustración 27: Ejemplo Lexicográfico, Pesos y Matriz de ordenación de criterios

Ahora con las dos columnas anexas, que estarán ocultas al usuario, realizamos la ponderación numérica.

En base a los datos de la matriz anterior, sabemos que las alternativas 1 y 2 están empatadas en todos sus criterios, por lo cual la suma de ambas será igual y deberemos realizar la resta de 0,002 en la suma de la Alternativa 2, con el fin de diferenciarlas en la ordenación final.

Por otro lado, observamos que la Alternativa más valorada por el decisor es la 4 en el criterio más importante para el mismo, con lo que esta alternativa ser la primera a seleccionar en la Ordenación final, seguida de las alternativas 1 y 2 con lo antes comentado.

Para el siguiente orden de jerarquía dentro de este criterio encontramos un empate en las alternativas 3 y 6. Este empate se resolverá evaluando los valores otorgados para el segundo criterio más importante en dichas alternativas. Como vemos, el valor de Alternativa 6 es mayor que el de la Alternativa 3 en el Criterio 7, con lo cual, la Alternativa 6 estará mejor valorada que la 3, en la columna Orden de decisión.

Por último, tenemos la Alternativa 5, que ha obtenido la peor valoración en el Criterio 2, el más importante para el decisor.

|               |        |            | ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN |
|---------------|--------|------------|-------------------|------------|
| Alternativa 1 | -325,5 | 4334233300 | Alternativa 4     | 6513613600 |
| Alternativa 2 | -325,5 | 4334233300 | Alternativa 1     | 4334233300 |
| Alternativa 3 | -151,9 | 2261566300 | Alternativa 2     | 4334233300 |
| Alternativa 4 | -343,7 | 6513613600 | Alternativa 6     | 2532152200 |
| Alternativa 5 | -585,8 | 1114421100 | Alternativa 3     | 2261566300 |
| Alternativa 6 | -391,3 | 2532152200 | Alternativa 5     | 1114421100 |
|               | 0      |            |                   |            |

Ilustración 28: Ejemplo Lexicográfico, Solución

#### 4.9 Suma Ponderada

El siguiente método implementado se encuentra en la hoja *SUMA PONDERADA*, y se trata del primero de los métodos cardinales expuestos.

Para este método además de los datos proporcionados en la Matriz de Decisión el usuario debe aportarnos información sobre la importancia de los criterios, así como fijar el método por el cual desea realizar la normalización del problema. Para facilitar la introducción de esta información, se ha habilitado una celda con una lista desplegable donde puede elegirse la opción por la cual normalizar los datos, y para fijar los pesos de los criterios se ha reservado una fila en la cual el usuario puede introducir los valores numéricos de los mismos.

| SUMA PONDERADA          |   |   |            |     |  |
|-------------------------|---|---|------------|-----|--|
| Método de normalización | <input type="text" value="MAX"/> <ul style="list-style-type: none"> <li>MAX</li> <li>TOTAL</li> <li>RANGO</li> <li>VECTOR UNITARIO</li> </ul> |   |            |     |  |
|                         | Criterio 1  |   | Criterio 4 | Cri |  |
| PESOS                   | 1   | 2 | 3          | 4   |  |

Ilustración 29: Suma ponderada, Normalización

|       | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| PESOS |            |            |            |            |            |            |            |            |

Ilustración 30: Suma ponderada, Pesos

Una vez que el decisor nos ha proporcionado esta información, podemos realizar la implementación del método. En este caso contamos con una función que nos facilitará en gran medida la resolución del problema, esta se denomina SUMAPRODUCTO(Matriz 1; Matriz 2), los en los términos correspondientes a las matrices introduciremos como Matriz 1, el rango de pesos dado para los criterios, y como Matriz 2, los valores de la alternativa de la fila de referencia. Con ello, y para simplificar la resolución del mismo introducimos la siguiente formulación en la cual en una misma columna integramos todas las posibles normalizaciones:

```
SI(1="";SI(2="%MAX";SUMAPRODUCTO(3;4);  
SI(2="%TOTAL";SUMAPRODUCTO(3;5);  
SI(2="%RANGO";SUMAPRODUCTO(3;6);  
SI(2="VECTOR UNITARIO";SUMAPRODUCTO(3;7);""))))
```

donde:

- (1) Alternativa de referencia
- (2) Celda para la elección del tipo de normalización
- (3) Rango de pesos para los criterios
- (4) Valores normalizados según % Max para la alternativa de referencia
- (5) Valores normalizados según % Total para la alternativa de referencia
- (6) Valores normalizados según % Rango para la alternativa de referencia
- (7) Valores normalizados según Vector Unitario para la alternativa de referencia

Con la columna generada después de la aplicación de la función SUMAPONDERADA y con el fin de evitar empates, introducimos dos columnas anexas. La primera de ellas se corresponde con un término correctivo que irá leyendo los valores de la columna suma ponderada hasta la que se encuentra en la misma fila y en el caso de darse coincidencia del dato correspondiente de la alternativa con alguno de los que figuran en la tabla con posiciones más elevadas, en esta columna introduciremos un incremento de 0,000000001x” El número de veces que ha aparecido dicho dato”. Para que este ajuste sea útil debemos introducir otra columna en la cual a la suma ponderada realizada le restemos este término calculado. Estas operaciones se mantendrán ocultas al usuario.

Finalmente realizamos la ordenación de las alternativas en base a la última columna calculada. Para ello empleamos la función K.ESIMO.MAYOR(Matriz;k), donde la Matriz en este caso será la columna oculta de suma ponderada con el ajuste comentado, y k representará la posición de la jerarquía que buscamos en cada línea. Esta función se ubicará en un bucle SI, pues debemos leer todas las alternativas

hasta encontrar la que se corresponda con la posición deseada para esa línea de la jerarquización.

Si lo aplicamos al ejemplo descrito a lo largo del Trabajo Fin de Grado tenemos:

En primer lugar, el decisor debe elegir el método de normalización, así como asignar los pesos a los criterios. De esta forma podemos realizar la implementación del mismo.

| SUMA PONDERADA          |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Método de normalización |            | % MAX      |            |            |            |            |            |            |  |
|                         | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
| PESOS                   | 1          | 8          | 3          | 6          | 5          | 4          | 7          | 2          |  |

Ilustración 31: Ejemplo Suma Ponderada, Normalización y Pesos

Con la información aportada por el decisor realizamos la suma ponderada y generamos los ajustes necesarios, que estarán ocultos ante el usuario. Una vez realizados estos cálculos y ordenando las alternativas con lo comentado anteriormente, tenemos que:

|               | VALORACIÓN  |             |             | ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|
| Alternativa 1 | 26,01772487 | 0           | 26,01772487 | Alternativa 4     | 30,14705882 |
| Alternativa 2 | 26,01772487 | 0,000000002 | 26,01772487 | Alternativa 1     | 26,01772487 |
| Alternativa 3 | 25,95580454 | 0           | 25,95580454 | Alternativa 2     | 26,01772487 |
| Alternativa 4 | 30,14705882 | 0           | 30,14705882 | Alternativa 3     | 25,95580454 |
| Alternativa 5 | 17,96164021 | 0           | 17,96164021 | Alternativa 6     | 23,75079365 |
| Alternativa 6 | 23,75079365 | 0           | 23,75079365 | Alternativa 5     | 17,96164021 |
|               |             | 0           |             |                   |             |

Ilustración 32: Ejemplo Suma Ponderada, Solución

Como podemos observar (Ilustración 32), la primera alternativa, pues es la que mejor valoración obtiene, se corresponde con la Alternativa 4. En la segunda posición y antes de introducir el término correctivo las alternativas 1 y 2 se muestran empatadas, sin embargo, cuando realizamos el ajuste, restando  $2 \times 10^9$  a la Alternativa 2, la Alternativa 1 pasa a estar mejor valorada que la segunda en esta proporción, con lo cual la Alternativa 1 se posiciona mejor que la 2. En las siguientes posiciones se aprecia claramente que a medida que la alternativa obtiene una valoración más baja, esta obtiene peor jerarquización en la tabla final.

#### 4.10 Producto Ponderado

El método que podemos encontrar en la hoja *Producto Ponderado* presenta gran similitud con el comentado en el punto 3.10 Suma Ponderada. Sin embargo, y

aunque los datos requeridos para la implementación son los mismos que el anterior, en este caso deben ser tratados antes de comenzar a operar con ellos. Ahora tampoco contamos con una función que nos ofrezca de forma directa la ejecución del método.

Una vez que el usuario ha seleccionado el tipo de normalización, debe proporcionarnos los pesos de los criterios. Estos pesos que el decisor nos da deben ser tratados, pues en este caso los pesos han de ser relativos, es decir, deben ser ponderados. Para ellos, dividiremos el valor de cada peso entre la suma de todos los pesos. De esta forma podemos conocer la importancia relativa de cada atributo frente a los demás.

A continuación, procedemos a la construcción de la función mediante la cual obtendremos la ordenación de las alternativas. Para ello comenzamos con la evaluación dentro de un bucle SI del tipo de normalización seleccionada por el usuario, pues de esta manera podremos absorber directamente los datos de la hoja *Normalización*.

Una vez dentro del bucle, para un tipo de normalización concreta, evaluaremos la existencia de cada valor en la matriz normalizada, pues si no existe dicho dato, por ser la matriz de menores dimensiones que la máxima, dentro de la función en esa posición sumaremos cero. Si por el contrario si existe esta posición, el dato que se encuentre en esa celda será elevado al valor del peso ponderado con el que se corresponda. Realizaremos el sumatorio de todos estos datos elevados a sus correspondientes atributos para cada alternativa.

$$\begin{aligned} &SI(1="" ; "" ; SI(2="" \% MAX"" ; SI(5="" ; 0 ; 5^3) + SI(5="" ; 0 ; 5^4) + \dots ; \\ &SI(2="" \% TOTAL"" ; SI(6="" ; 0 ; 6^3) + SI(6="" ; 0 ; 6^4) + \dots ; \\ &SI(2="" \% RANGO"" ; SI(7="" ; 0 ; 7^3) + SI(7="" ; 0 ; 7^4) + \dots ; \\ &SI(2="" VECTOR UNITARIO"" ; SI(8="" ; 0 ; 8^3) + SI(8="" ; 0 ; 8^4) + \dots ; "" )))) \end{aligned}$$

donde:

- (1) Alternativa de referencia
- (2) Celda para la elección del tipo de normalización
- (3) Peso ponderado del Criterio 1
- (4) Peso ponderado del Criterio 2
- (5) Valor normalizado según % Max para la alternativa de referencia
- (6) Valor normalizado según % Total para la alternativa de referencia
- (7) Valor normalizado según % Rango para la alternativa de referencia

(8) Valor normalizado según Vector Unitario para la alternativa de referencia

Para poder evaluar las posibles alternativas que resulten empatadas, como en otros métodos, introducimos un término correctivo, que ubicará en mejor posición en la ordenación final a la alternativa que dentro del empate se encuentre en una posición más alta en la lista de alternativas. Esto lo conseguimos mediante la función CONTAR.SI en una columna anexa que evaluará las veces que se repite un dato de la columna Producto Ponderado hasta esa línea, si el valor ya ha aparecido con anterioridad en esta columna, oculta al usuario, aparecerá el valor correspondiente a "0,000000001x" El número de veces que ha aparecido dicho dato". Finalmente empleamos otra columna de apoyo que será el resultado de la columna Producto Ponderado menos la columna con el término de repetición comentado.

Para realizar la ordenación final de alternativas aplicamos la función K.ESIMO.MAYOR(Matriz, k), como en métodos anteriores, donde el término Matriz se corresponde con el rango de la segunda columna de apoyo para las alternativas, y k irá variando desde 1 en la primera línea hasta 10, que será el máximo número de alternativas posibles.

Si comentamos este método bajo el ejemplo de estudio tenemos, en primer lugar, los datos proporcionados por el usuario y la ponderación de los pesos dados.

| <b>PRODUCTO PONDERADO</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |  |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Método de normalización   |             | % MAX       |             |             |             |             |             |             |  |
|                           | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
| PESOS                     | 5           | 2           | 3           | 4           | 1           | 6           | 7           | 8           |  |
| PESOS PONDERADOS          | 0,138888889 | 0,055555556 | 0,083333333 | 0,111111111 | 0,027777778 | 0,166666667 | 0,194444444 | 0,222222222 |  |

Ilustración 33: Ejemplo Producto Ponderado, Pesos y Pesos ponderados

En este caso hemos seleccionado como método de normalización %Max. Con esto podemos calcular el producto ponderado de cada alternativa, a partir del cual procederemos a realizar la ordenación final de alternativas.

|               | VALORACIÓN  |             |             | ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|
| Alternativa 1 | 7,6205057   | 0           | 7,6205057   | Alternativa 4     | 7,779493151 |
| Alternativa 2 | 7,6205057   | 0,000000002 | 7,620505698 | Alternativa 3     | 7,715977319 |
| Alternativa 3 | 7,715977319 | 0           | 7,715977319 | Alternativa 1     | 7,6205057   |
| Alternativa 4 | 7,779493151 | 0           | 7,779493151 | Alternativa 2     | 7,6205057   |
| Alternativa 5 | 7,199297248 | 0           | 7,199297248 | Alternativa 6     | 7,427403467 |
| Alternativa 6 | 7,427403467 | 0           | 7,427403467 | Alternativa 5     | 7,199297248 |
|               |             | 0           |             |                   |             |

Ilustración 34: Ejemplo Producto Ponderado, Solución

Como podemos observar (Ilustración 34), aunque los datos obtenidos presentan gran similitud, la Alternativa 4 es indudablemente la mejor valorada, por lo cual se encuentra en primer lugar en el orden de decisión final. En la segunda posición encontramos empatadas las alternativas 1 y 2, lo cual corregimos frente a la solución final mediante el término correctivo que se restada a la segunda alternativa, ubicándola una posición más baja que a la Alternativa 1. En las posiciones cuarta, quinta y sexta no existe ningún tipo de problemática, pues todas tienen valores diferentes y se ordenarán según estos sean más bajos.

#### 4.11 Asignación Lineal

En la hoja *Asignación Lineal*, encontramos la implementación de un método para el cual Microsoft Excel ® nos permite desarrollar dos variantes basadas ambas en funciones jerarquía.

Con el fin de que el usuario pueda elegir entre las dos opciones mediante las cuales podemos implementar este método, ha sido habilitada una celda con una lista desplegable en la cual se muestran las dos opciones. Esta lista ha sido adaptada mediante el comando Validación de Datos, ya comentado anteriormente.

| ASIGNACIÓN LINEAL        |                               |            |            |
|--------------------------|-------------------------------|------------|------------|
| Elegir tipo de jerarquía | MEDIA<br>EQUIVALENTE<br>MEDIA |            |            |
|                          | Criterio 1                    | Criterio 2 | Criterio 3 |
| Alternativa 1            | 3                             | 2,5        | 3,5        |

Ilustración 35:Asignación Lineal

##### 4.11.1 Jerarquía Media

En primer lugar, podemos resolver este método mediante la función `JERARQUIA.MEDIA(Dato;Rango;Orden)`, donde el último término en este caso no es necesario, pues se realiza la jerarquización de manera ascendente por defecto. Con esta función conseguimos una ordenación de las alternativas en cada criterio, en la que la mejor alternativa para ese atributo será valorada con un 1, y así sucesivamente, hasta alcanzar la última opción en la que obtendrá como valor el número de alternativas con las que cuenta el problema.

Es interesante estudiar cómo opera esta función ante empates, pues es la principal diferencia entre las dos metodologías propuestas para este método. En este primer caso, si tenemos un empate entre dos o más alternativas, realizaremos la jerarquía promedio de las mismas.

Una vez que contamos con las jerarquizaciones para todos los criterios, podemos realizar la ordenación final de las alternativas. Esta ordenación la realizamos según el siguiente procedimiento. En primer lugar, realizamos la suma, para cada alternativa de todas las posiciones obtenidas en las jerarquizaciones de los atributos. Si dos sumas, es decir, si dos alternativas resultan iguales en todos los criterios, debemos operar como en casos ya comentados añadiendo un término correctivo, en este caso sumar 0,0000001 más a medida que bajamos en la columna de suma de jerarquizaciones o *Valoración*. Con esta medida ante el empate total de dos alternativas quedará en mejor posición la que antes se encuentre situada en la lista de alternativas inicialmente realizada.

Si nos fijamos en esta columna suma obtenida, podemos ver que ya tenemos la ordenación numérica de las alternativas, sin embargo, debemos enumerar la mismas de manera que el decisor pueda interpretarlas con facilidad. Así pues, introducimos otra nueva columna en la cual mediante un bucle SI y la función K.ESIMO.MENOR(Matriz; k) podemos formular lo siguiente:

$$SI(1=K.ESIMO.MENOR(2;CONTAR.SI(2;"=0")+1);3;...$$

donde:

- (1) Suma de la alternativa valorada.
- (2) Rango de sumas de todas las alternativas.
- (3) Alternativa que se corresponde con el valor de 1.

Mediante esta formulación lo que conseguimos es evaluar que alternativa se corresponde con la posición que ocupa la celda seleccionada en la jerarquización. Introducimos la función CONTAR.SI para problemas en los cuales el número de alternativas sea menor que el máximo, pues al estar realizando las operaciones sobre la columna de apoyo que suma los valores de las alternativas, en el supuesto que una alternativa no exista esa suma será cero y puesto que utilizamos la función K.ESIMO.MENOR, asociará este mínimo con la primera línea de la jerarquización.

En **naranja** tenemos el término que irá variando en función de la posición de la jerarquía evaluada. Este irá creciendo desde +1 hasta el número de alternativas con las que cuente el problema.

Si lo aplicamos al ejemplo que hemos desarrollado durante este manual tenemos:

|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Alternativa 1 | 3          | 2,5        | 3,5        | 3          | 2          | 4,5        | 3,5        | 3          |  |
| Alternativa 2 | 3          | 2,5        | 3,5        | 3          | 2          | 4,5        | 3,5        | 3          |  |
| Alternativa 3 | 3          | 4,5        | 1          | 1          | 6          | 2          | 5          | 1          |  |
| Alternativa 4 | 1          | 1          | 6          | 5,5        | 4          | 1          | 1,5        | 3          |  |
| Alternativa 5 | 6          | 6          | 5          | 5,5        | 2          | 3          | 6          | 6          |  |
| Alternativa 6 | 5          | 4,5        | 2          | 3          | 5          | 6          | 1,5        | 5          |  |
|               |            |            |            |            |            |            |            |            |  |

*Ilustración 36: Ejemplo Asignación Lineal Media, Jerarquización*

Aquí podemos (Ilustración 36) ver lo siguiente, la alternativa mejor valorada para el primer criterio por el decisor es la Alternativa 4, pues es la mejor posición obtiene en la jerarquización.

Para la siguiente posición encontramos un triple empate, es decir tenemos tres alternativas que obtienen el mismo valor y se encuentran en segunda posición de elección. Según la función JERARQUIA.MEDIA planteada tenemos lo siguiente en este caso: como es un triple empate en la segunda posición, las alternativas implicadas se corresponden con las jerarquías cuyas valoraciones son 2, 3 y 4, como anteriormente hemos comentado ahora debemos realizar el promedio de estos valores, con lo que obtendremos la posición asignada a estas alternativas. Es decir, operamos de la siguiente manera para conocer el promedio de la valoración, sumamos 2, 3 y 4, y lo dividimos entre el número de alternativas entre las cuales se ha producido el empate, tenemos entonces  $9/3=3$  para este caso. Con lo cual el valor asignado para las alternativas empatadas en este caso será 3.

Las siguientes alternativas seguirán la ordenación numérica considerando las posiciones ocupadas por el empate, en nuestro ejemplo hemos llegado hasta la posición cuarta en el empate, con lo que la siguiente posición que puede ser ocupada será la cinco, en la que se encuentra la Alternativa 6.

Por último, la Alternativa 5 ocupará la última posición, obteniendo una valoración de 6, puesto que es el número de alternativas con las que cuenta el problema.

Este procedimiento se repite en todos los criterios, y una vez realizado esto, hacemos el sumatorio de las valoraciones obtenidas para cada alternativa, y aplicamos la función antes comentada para obtener la Ordenación Final. Con lo que tenemos (Ilustración 37):

|               | VALORACIÓN | ELECCIÓN      | VALORACIÓN |
|---------------|------------|---------------|------------|
| Alternativa 1 | 25,0       | Alternativa 4 | 23,0       |
| Alternativa 2 | 25,0       | Alternativa 3 | 23,5       |
| Alternativa 3 | 23,5       | Alternativa 1 | 25,0       |
| Alternativa 4 | 23,0       | Alternativa 2 | 25,0       |
| Alternativa 5 | 39,5       | Alternativa 6 | 32,0       |
| Alternativa 6 | 32,0       | Alternativa 5 | 39,5       |
|               |            |               |            |

Ilustración 37: Ejemplo Asignación Lineal Media, Solución

Como vemos en la columna *Valoración* (Ilustración 37), la alternativa que mejores calificaciones ha obtenido, lo que se corresponde con un valor menor final en esta, es la Alternativa 4. Lo que se traslada a la columna *Elección*, mediante la función K.ESIMO.MENOR, en tener como primera alternativa en el orden de selección la 4.

A continuación, tenemos las alternativas 1 y 2 que obtienen la misma valoración. Este empate se resuelve con el termino correctivo antes comentado, pues a la primera alternativa la añadimos 0,0000001 y a la segunda 0,0000002 en la suma de su valoración, por lo cual al aplicar la función K.ESIMO.MENOR la Alternativa 1 obtiene mejor posicionamiento.

En la restante ordenación no se aprecia ninguna anomalía y las alternativas se ordenan según lo esperado.

#### 4.11.2 Jerarquía Equivalente

Para la segunda opción de implementación del método de Asignación Lineal emplearemos la función de Microsoft Excel ® conocida como JERARQUIA.EQV(Dato; Rango; Orden), como en el caso anterior el último término no es necesario, pues la jerarquización se ejecuta de forma ascendente por defecto. Los campos Dato y Rango funcionan igual que para la otra implementación.

La principal diferencia a la hora de aplicar esta función en lugar del otro tipo de jerarquización radica en la forma que se distribuyen los empates. En este caso, en el momento que dos o más alternativas obtienen la misma valoración en la matriz de datos, en vez de realizar el promedio de sus jerarquías como hacíamos en el caso anterior, ahora otorgamos a estas alternativas el valor de la posición correspondiente a la jerarquía obtenida para este valor a todas las alternativas que resulten empatadas. Las restantes alternativas por ordenar obtienen el valor de la jerarquización correspondiente a las siguientes posiciones.

Una vez realizada esta jerarquización en la matriz, el proceso de suma y elección se realiza de igual manera que lo comentado para el caso de Jerarquía Media. Si lo vemos directamente sobre el ejemplo, tenemos ahora la siguiente matriz:

|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 |  |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Alternativa 1 | 2          | 2          | 3          | 2          | 1          | 4          | 3          | 2          |  |
| Alternativa 2 | 2          | 2          | 3          | 2          | 1          | 4          | 3          | 2          |  |
| Alternativa 3 | 2          | 2          | 1          | 1          | 4          | 2          | 3          | 1          |  |
| Alternativa 4 | 1          | 1          | 3          | 2          | 2          | 1          | 1          | 1          |  |
| Alternativa 5 | 2          | 2          | 2          | 2          | 1          | 1          | 2          | 2          |  |
| Alternativa 6 | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          |  |

Ilustración 38: Ejemplo Asignación Lineal Equivalente, Jerarquización

Si observamos (Ilustración 38) las valoraciones para el primer criterio vemos que existe un doble empate para las alternativas 4 y 6, estas alternativas son las mejor valoradas para el Criterio 1, con lo cual obtienen la mejor jerarquización posible según este método, es decir, 1. A continuación tenemos para la segunda posición un empate cuádruple, con lo que las alternativas 1, 2, 3 y 5 será valoradas con dos puntos por estar segundas en la lista.

El ejemplo comentado para el Criterio 1 es similar para los demás criterios, pues como vemos, ante todos los empates posibles generados en la matriz, las alternativas que obtienen la misma valoración dentro del mismo criterio obtienen todas la jerarquización más alta, o dicho de otro modo, el valor más bajo, de entre los que no han sido aún asignados.

Una vez dados los valores jerarquizados a la matriz, operamos como en la otra modalidad, es decir, nos apoyamos en una columna suma de los puntos obtenidos para cada alternativa, en la cual además introducimos el término correctivo ya comentado. Con ello en este caso obtenemos una columna como la siguiente, y su posterior ordenación mediante la función K.ESIMO.MENOR.

|               | VALORACIÓN |
|---------------|------------|
| Alternativa 1 | 19,0       |
| Alternativa 2 | 19,0       |
| Alternativa 3 | 16,0       |
| Alternativa 4 | 12,0       |
| Alternativa 5 | 14,0       |
| Alternativa 6 | 8,0        |

| ELECCIÓN      | VALORACIÓN |
|---------------|------------|
| Alternativa 6 | 8,0        |
| Alternativa 4 | 12,0       |
| Alternativa 5 | 14,0       |
| Alternativa 3 | 16,0       |
| Alternativa 1 | 19,0       |
| Alternativa 2 | 19,0       |

Ilustración 39: Ejemplo Asignación Lineal Equivalente (II)

#### 4.12 TOPSIS

La implementación de esta metodología se encuentra en la hoja *TOPSIS*. Para poder aplicar el método el decisor debe proporcionarnos tanto la información requerida en la matriz decisión como el orden de preferencia de los criterios.

Como en los casos anteriores, habilitaremos un apartado en la hoja para que el usuario pueda introducir los pesos, que nos proporcionarán la ordenación de los atributos. En este caso y puesto que nos encontramos ante un método compensatorio, los pesos deben ser ponderados para poder realizar la comparación entre los atributos.

Para convertir los pesos dados por el usuario en pesos ponderados debemos dividir cada valor asignado entre la suma de todos los valores dados a los pesos para cada criterio. De esta forma asignaremos a todos los pesos la fracción que le corresponde según la importancia relativa asignada por el decisor. Para problemas de menos de 15 criterios, las casillas que queden vacías han sido codificadas con la línea superior donde se indica el atributo con el cual se corresponden mediante un bucle SI.

En este caso la matriz desde la cual realizaremos las operaciones será generada mediante la matriz normalizada a partir de la técnica de Vector Unitario y los pesos ponderados de los criterios. Cada celda de la matriz construida contendrá el resultado de la multiplicación del valor correspondiente en la matriz de normalización realizada para el procedimiento de Vector Unitario por el peso ponderado del criterio correspondiente a la columna en la cual estemos situados.

Una vez hemos elaborado esta matriz podemos extraer la información necesaria para dar solución al problema. En este método nos apoyamos de dos vectores, a partir de los cuales calcularemos las distancias ideales, denominados de la forma:

·  $\mathbf{Vi}^+$ , que expresa, mediante la función  $\text{MAX}()$ , el valor máximo resultante de la matriz para cada criterio.

·  $\mathbf{Vi}^-$ , donde podemos encontrar el mínimo asignado para cada atributo, calculado con la función  $\text{MIN}()$ .

Una vez han sido calculados estos vectores, pasamos a calcular las distancias. Para realizar el cálculo debemos realizar la suma de los productos resultantes de la diferencia de cada vector al valor asignado dentro de la matriz implementada. Es decir, obtendremos dos nuevos vectores, con un tamaño correspondiente al número de alternativas del problema, que representarán respectivamente la distancia ideal,  $\mathbf{d}^+(\mathbf{A}_i)$ , y la distancia anti-ideal,  $\mathbf{d}^-(\mathbf{A}_i)$ , donde  $i$  se corresponde con cada alternativa. En Microsoft Excel ® quedará programado como:

SI(1="";"";RAIZ(SI(ESNUMERO(2);(2-3)^2;0)+SI(ESNUMERO(4);(4-5)^2;0)+...

donde:

- (1) Alternativa 1
- (2) Valor en la matriz de la Alternativa 1 para el Atributo 1
- (3) Valor de la distancia ideal o anti-ideal para el Atributo 1
- (4) Valor en la matriz de la Alternativa 1 para el Atributo 2
- (5) Valor de la distancia ideal o anti-ideal para el Atributo 2

Cuando disponemos de ambas distancias, expresadas en un vector columna pasamos a calcular el Ratio de Similaridad (i)..., con el cual podremos hallar que alternativa resulta mejor basándonos en la distancia más próxima a la unidad. Para calcular este ratio debemos realizar la fracción correspondiente con la distancia ideal entre la suma de la distancia ideal más la distancia anti-ideal, para cada alternativa. Además, debemos contemplar posibles empates entre alternativas, lo cual solucionaremos introduciendo un término correctivo en la función. Este término como en casos anteriores restará 0,0000000001 unidades a partir de la segunda alternativa que resulte empatada con otra.

Para, finalmente, obtener la ordenación de las alternativas aplicamos la función K.ESIMO.MAYOR ya conocida.

Llevando lo comentado al ejemplo con el que estamos trabajando tenemos:

En primer lugar, el apartado reservado para la introducción y ponderación de pesos. En la línea (PESOS) el usuario debe introducir los pesos numéricos y positivos de los criterios, y en la segunda (PESOS PONDERADOS) se ha implementado la ponderación de los mismos.

| TOPSIS           |             |             |             |             |             |             |             |             |  |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|                  | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
| PESOS            | 3           | 4           | 5           | 3           | 2           | 2           | 9           | 6           |  |
| PESOS PONDERADOS | 0,088235294 | 0,117647059 | 0,147058824 | 0,088235294 | 0,058823529 | 0,058823529 | 0,264705882 | 0,176470588 |  |

Ilustración 40: Ejemplo TOPSIS, Pesos y ponderación de Pesos

A continuación, con los datos proporcionados por el usuario construimos la matriz del método. En la matriz los datos están normalizados mediante el método de Vector Unitario, pudiendo elegir dentro de este, si los números son convertidos en crecientes mediante inversión o cambio de signo.

Con esta matriz realizamos los vectores  $V_i^+$  y  $V_i^-$  como hemos indicado anteriormente.

|               | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alternativa 1 | 0,03180927  | 0,047286345 | 0,05891262  | 0,037066238 | 0,026388337 | 0,022750994 | 0,099791144 | 0,069360247 |
| Alternativa 2 | 0,03180927  | 0,047286345 | 0,05891262  | 0,037066238 | 0,026388337 | 0,022750994 | 0,099791144 | 0,069360247 |
| Alternativa 3 | 0,03180927  | 0,035464759 | 0,07855016  | 0,04942165  | 0,020179317 | 0,028438742 | 0,071279388 | 0,10404037  |
| Alternativa 4 | 0,06361854  | 0,082751104 | 0,03927508  | 0,024710825 | 0,022766409 | 0,030713842 | 0,142558776 | 0,069360247 |
| Alternativa 5 | 0,015904635 | 0,002364317 | 0,054985112 | 0,024710825 | 0,026388337 | 0,025026093 | 0,066527429 | 0,04458873  |
| Alternativa 6 | 0,02120618  | 0,035464759 | 0,062840128 | 0,037066238 | 0,02111067  | 0,006825298 | 0,142558776 | 0,06242422  |

|         |             |             |            |             |             |             |             |            |
|---------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| $V_i^+$ | 0,06361854  | 0,082751104 | 0,07855016 | 0,04942165  | 0,026388337 | 0,030713842 | 0,142558776 | 0,10404037 |
| $V_i^-$ | 0,015904635 | 0,002364317 | 0,03927508 | 0,024710825 | 0,020179317 | 0,006825298 | 0,066527429 | 0,04458873 |

Ilustración 41: Ejemplo TOPSIS, Matriz normalizada y Vectores  $V_i^+$  y  $V_i^-$

Como podemos ver (Ilustración 41), dentro de estos vectores aparecen para cada criterio los valores máximo y mínimo alcanzado para cada criterio.

Finalmente calculamos las distancias y evaluamos en la columna  $li$  el Ratio de Similitud, estableciendo la ordenación final de alternativas según la proximidad de cada una de ellas a la unidad. En este caso la mejor alternativa será la 4, seguida por la 1 y la 2, que como podemos ver están empatadas por lo que entrará en juego el término correctivo que restará 0,0000000001 al índice alcanzado para la alternativa 2.

|               | $d_i^+$    | $d_i^-$    | $li$       |
|---------------|------------|------------|------------|
| Alternativa 1 | 0,07683135 | 0,06943715 | 0,47472388 |
| Alternativa 2 | 0,07683135 | 0,06943715 | 0,47472388 |
| Alternativa 3 | 0,09150031 | 0,08675237 | 0,48668198 |
| Alternativa 4 | 0,05804297 | 0,12534114 | 0,68348965 |
| Alternativa 5 | 0,13875231 | 0,02483195 | 0,15179917 |
| Alternativa 6 | 0,08224772 | 0,0890587  | 0,5198795  |

| ELECCIÓN      | ELECCIÓN    |
|---------------|-------------|
| Alternativa 4 | 0,683489654 |
| Alternativa 6 | 0,519879499 |
| Alternativa 3 | 0,486681976 |
| Alternativa 1 | 0,474723878 |
| Alternativa 2 | 0,474723878 |
| Alternativa 5 | 0,151799169 |

Ilustración 42: Ejemplo TOPSIS (III)

#### 4.13 AHP

En la hoja de trabajo *AHP* hemos llevado a cabo la implementación de dicho método. Ahora el usuario juega un factor clave, pues la cantidad de información requerida para ayudarlo en la toma de decisión es específica para cada comparación de cada par de alternativas. Del mismo modo el usuario deberá poder elegir el tipo de aproximación por la cual se desarrollará el método entre las cuatro posibles alternativas comentadas en el Capítulo 3.

Para elegir la aproximación por la cual el método será implementado, el usuario dispone de una lista desplegable, generada mediante validación de datos, semejante a las comentadas para otros métodos.



Ilustración 43: AHP, Aproximaciones

Para comenzar el desarrollo de la metodología AHP, el decisor debe facilitarnos información sobre la comparación de pares de criterios, así como la evaluación de preferencias entre pares de alternativas. Para facilitar la introducción de estos datos se ha facilitado una serie de matrices mediante las cuales el usuario podrá aportar los valores numéricos de comparación según la leyenda que se muestra en la propia hoja. Dichas valoraciones deben ser números entre 1/9 y 9, pudiendo asignarse cualquier valor intermedio, tanto entero como decimal. Si el usuario desea introducir fracciones, antes de la misma deberá poner el signo =. Si el dato introducido no cumple estas condiciones, aparecerá un mensaje como el siguiente (Ilustración 44):

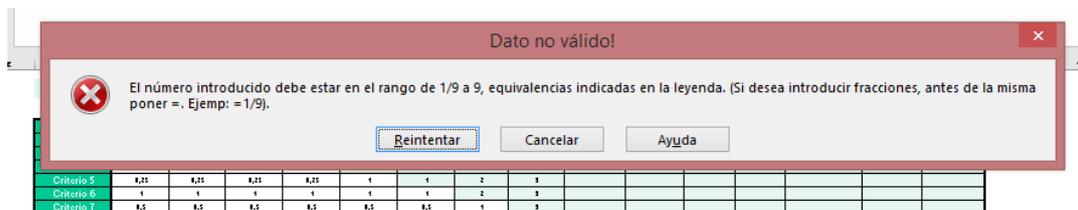


Ilustración 44: AHP, Escala de Datos

Un ejemplo de la matriz en la cual el usuario debe introducir los datos es la siguiente (Ilustración 45):

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 45: AHP, Ejemplo introducción de datos

De forma que en color ■ aparecerá en este caso el criterio para el cual realizaremos la comparación de alternativas, en ■ figurarán las alternativas disponibles del problema y el color ■ se reservará para las celdas en las cuales el usuario debe introducir los datos de las comparaciones. En las celdas no coloreadas de la matriz se introducirá la fórmula SI(“Dato correspondiente al simétrico”=“”;“”;1/“Dato correspondiente al simétrico”), mediante la cual, si no existe valor en la

comparación inversa, esta celda se mostrará vacía, en caso contrario realizaremos el inverso del valor introducido por el usuario, las casillas que contienen esta formulación se bloquearán, al igual que en las que el usuario no deba realizar cambios, como medida de seguridad ante posibles errores.

En el caso de la matriz de criterios, se procederá de igual manera, pues el usuario introducirá valores numéricos de comparación entre pares de criterios.

Con la información ya facilitada por el decisor, podemos comenzar a operar con los datos, para obtener cada uno de los Vectores Pesos. Para ello nos centraremos en cada una de las posibles aproximaciones que debemos realizar según la elección del usuario.

#### 4.13.1 Aproximación 1

Si la aproximación que ha sido seleccionada es la 1, realizaremos, tanto para la matriz de criterios como para cada uno de los criterios individualmente, la suma por filas de todos los datos encontrados en cada matriz. De esta forma obtendremos un vector columna, con una dimensión igual al número de criterios comparados en el primer caso, y para cada uno de los criterios un vector columna de tamaño proporcional al número de alternativas para las cuales el problema ha sido formulado. A partir de cada una de las columnas fila, generaremos su correspondiente Vector Pesos. Llamaremos Vector Pesos en este caso a la división de cada dato del vector suma, entre la suma de todos los datos de dicho vector.

#### 4.13.2 Aproximación 2

En el caso de elegir la Aproximación 2, efectuaremos el sumatorio por columnas de cada una de las matrices para las que el usuario nos ha proporcionado información. Una vez construido este vector columna, realizamos el inverso de cada valor obtenido para cada atributo en el caso de la matriz de criterios y para cada alternativa en los correspondientes vectores de cada atributo.

Para finalizar la segunda aproximación, construimos el Vector Pesos, por medio de la fracción del inverso de cada dato entre la suma de todos los inversos correspondientes en cada vector.

#### 4.13.3 Aproximación 3

Para la implementación de la Aproximación 3, nos apoyaremos en el vector suma por columnas generado en la anterior aproximación. Ahora debemos dividir cada dato de cada una de las matrices entre el valor del vector suma correspondiente.

Una vez realizado este paso, construimos el Vector Pesos, mediante la suma por filas de la matriz obtenida, entre el número de columnas generado.

#### 4.13.4 Aproximación 4

La última aproximación, Aproximación 4, se implementa mediante la multiplicación de los elementos de cada fila, y sobre ellos hacer la raíz correspondiente al número de columnas de la matriz generada en cada caso. La formulación empleada en este caso será la siguiente:

$SI(1="" ; "" ; SI(CONTAR(2)=2 ; (PRODUCTO(3))^{(1/CONTAR(2))} ; SI(CONTAR(2)=3 ; (PRODUCTO(3))^{(1/CONTAR(2))} ; SI($ ....

donde:

- (1) Alternativa o Atributo de referencia
- (2) Rango máximo de columnas
- (3) Celdas correspondientes al número evaluado en 2

Repitiendo el bucle hasta alcanzar en el valor enmarcado en rojo el número máximo de columnas para cada matriz de información.

Con esta implementación obtenemos un vector columna de dimensión igual al número de criterios o alternativas correspondiente a la matriz de datos. A partir de dicho vector, construimos el Vector Pesos como en las anteriores alternativas, es decir, realizamos la fracción de cada celda del vector entre la suma total de celdas.

Una vez construido el Vector Pesos según alguna de las aproximaciones elaboradas, representamos en la siguiente matriz un resumen con todos los vectores obtenidos para cada uno de los criterios. Para facilitar los siguientes cálculos el Vector Pesos generado para la matriz criterios se mostrará ahora transpuesto.

Con toda la información resumida, generamos la Matriz de Comparación, mediante la formulación:

$SI(1="" ; "" ; SUMAPRODUCTO(2;3)-$   
 $SI(CONTAR.SI(4)>1;0,000000001*CONTAR.SI(4;0))$

donde:

- (1) Alternativa evaluada
- (2) Fila en la que se encuentra el dato 1

- (3) Vector Pesos de la Matriz de Criterios transpuesto
- (4) Vector de suma de los valores obtenidos en cada alternativa para cada criterio

Como podemos ver, mediante el bucle SI y la función de Microsoft Excel ® CONTAR.SI, introducimos la corrección en caso de empates.

Finalmente, con la Matriz de Comparación elaborada, procedemos a la ordenación de alternativas que mostraremos al decisor. Esta jerarquización se construye como en otros métodos, mediante la aplicación de la función K.ESIMO.MAYOR(Rango:k), donde, como ya sabemos, el Rango se corresponde con la Matriz de Comparación y el valor de k irá variando de 1 a 10, a lo largo de la tabla generada.

A continuación, aplicamos lo comentado para este método sobre el ejemplo tratado a lo largo del presente Trabajo Fin de Grado. Nos centraremos en el caso de una aproximación concreta, pues para las tres restantes operamos de igual manera. Por ejemplo, fijamos la Aproximación 4.

Con ello completamos todos los valores para el ejemplo sobre el cual estamos desarrollando todos los métodos. En este caso el problema tiene unas dimensiones de 6 Alternativas y 8 Criterios, con lo cual establecemos las comparaciones pareadas para las celdas correspondientes.

Si nos centramos en un criterio concreto, pues los demás y la matriz de criterios se implementan de igual manera, tenemos que la matriz donde introducimos las comparaciones pareadas para las alternativas en un criterio definido se corresponde con (Ilustración 46):

| Criterio 1    | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 | 1             | 4             | 2             | 0,142857143   | 3             | 1             |  |
| Alternativa 2 | 0,25          | 1             | 0,2           | 1             | 4             | 0,2           |  |
| Alternativa 3 | 0,5           | 5             | 1             | 3             | 0,142857143   | 3             |  |
| Alternativa 4 | 7             | 1             | 0,333333333   | 1             | 7             | 9             |  |
| Alternativa 5 | 0,333333333   | 0,25          | 7             | 0,142857143   | 1             | 0,333333333   |  |
| Alternativa 6 | 1             | 5             | 0,333333333   | 0,111111111   | 3             | 1             |  |

Ilustración 46: Ejemplo AHP, Asignación de valoraciones

Los datos introducidos manualmente se corresponden con los coloreados en  , mientras que su inverso se genera automáticamente mediante lo programado.

Una vez que hemos establecido estos valores y puesto que hemos decidido fijar la Aproximación 4, construimos el Vector Pesos.

|               |             | VECTOR PESOS |
|---------------|-------------|--------------|
| Alternativa 1 | 1,227963714 | 0,181064708  |
| Alternativa 2 | 0,584803548 | 0,086229978  |
| Alternativa 3 | 1,214826004 | 0,179127537  |
| Alternativa 4 | 2,29730975  | 0,338741051  |
| Alternativa 5 | 0,550321208 | 0,081145516  |
| Alternativa 6 | 0,906681141 | 0,133691211  |

Ilustración 47: Ejemplo AHP, Vector Pesos

Una vez generado el vector pesos para la Matriz de Criterios y todos los criterios, obtenemos (Ilustración 48):

| Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| 0,079000874 | 0,10232052  | 0,080447523 | 0,074043465 | 0,124128651 | 0,161116854 | 0,117517727 | 0,118168994 |  |
| 0,052426478 | 0,123813937 | 0,147635722 | 0,131241066 | 0,148266932 | 0,090327717 | 0,102773428 | 0,104610682 |  |
| 0,121948201 | 0,140230486 | 0,04089889  | 0,062955074 | 0,129232748 | 0,11012207  | 0,078817445 | 0,152105856 |  |
| 0,197681513 | 0,043879682 | 0,105268982 | 0,151734539 | 0,064745541 | 0,048174169 | 0,069155516 | 0,074265079 |  |
| 0,079713872 | 0,082330313 | 0,118722837 | 0,089638934 | 0,025690468 | 0,082259989 | 0,157342305 | 0,042894738 |  |
| 0,069229061 | 0,107425063 | 0,107026046 | 0,090386922 | 0,10793566  | 0,107999202 | 0,074393581 | 0,10795465  |  |

| Matriz de criterios |             |             |             |             |             |             |             |  |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Criterio 1          | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
| 0,146493277         | 0,204275411 | 0,039762981 | 0,129319481 | 0,111599331 | 0,104954304 | 0,123153622 | 0,058429817 |  |

Ilustración 48: Ejemplo AHP, Vectores Pesos de Criterios y Matriz de Criterios

A partir de esto datos obtenemos la Matriz de comparación (Ilustración 49) que nos permitirá ordenar las alternativas posteriormente.

| Matriz de comparación |               |               |               |               |               |  |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1         | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
| 0,097388667           | 0,100610808   | 0,100852056   | 0,086868286   | 0,078192624   | 0,086880493   |  |

Ilustración 49: Ejemplo AHP, Matriz de Comparación

Esta matriz la realizamos mediante la función SUMAPRODUCTO de cada alternativa para sus correspondientes atributos, e introducimos el término correctivo comentado para casos de empate.

En último lugar, ordenaremos las alternativas según preferencia, mediante la función K.ESIMO.MAYOR, desde la que ha obtenido mayor valoración en la Matriz de Comparación a la que menos.

| ORDEN DE ELECCIÓN |
|-------------------|
| Alternativa 3     |
| Alternativa 2     |
| Alternativa 1     |
| Alternativa 4     |
| Alternativa 6     |
| Alternativa 5     |

Ilustración 50: Ejemplo AHP, Solución

#### 4.14 Electre I

El siguiente método se desarrolla en la hoja *ELECTRE I*. Para la aplicación del mismo el usuario debe proporcionarnos información sobre los pesos de los atributos, el tipo de normalización por la cual desea realizar la implementación, así como dos indicadores nuevos, no introducidos en ningún otro método: el Umbral de Concordancia y el Umbral de Discordancia. Dicha información será introducida por el usuario de la siguiente forma:

- Para la elección del método de normalización, contamos con una lista desplegable.

The screenshot shows a window titled "ELECTRE I" with a sub-header "Elegir método de normalización". A dropdown menu is open, listing several options. The option "VECTOR UNITARIO" is selected and highlighted in blue. Below the menu, there is a field for "Concordancia" with the value "0,6" entered.

Ilustración 51: Electre I, Normalización

- Los pesos serán introducidos en la línea habilitada para ello, desde la cual podremos realizar la conversión de los mismos a pesos ponderados, con los que más tarde operaremos. Esta transformación la logramos dividiendo el valor de cada peso asignado entre la suma total de los pesos.

- Para los umbrales de Concordancia y Discordancia, el usuario debe introducir valores entre cero y la unidad, en las celdas habilitadas para ello.

The screenshot shows a window titled "Introducir umbrales". It contains two input fields: "Concordancia" and "Discordancia". Both fields are currently empty.

Ilustración 52 Electre I, Umbrales

Una vez aportada la información pertinente, podemos comenzar con la aplicación del método.

En primer lugar, construimos una matriz de apoyo con los datos generados según la normalización elegida por el usuario, esta matriz se nutre de la generada en la hoja *Normalización*, y sobre ella realizaremos los cálculos del método.

A partir de la matriz generada calcularemos las submatrices de Concordancia y Discordancia.

#### 4.14.1 Matriz de Concordancia

Esta matriz es construida con el fin de comparar las relaciones superación entre pares de alternativas para los criterios. La relación se establece mediante la evaluación de los valores normalizados, suponiendo que la matriz comienza a leerse en todo momento desde la columna de alternativas. Con esta aclaración tenemos que, posicionándonos en una celda concreta, todos aquellos valores de la matriz normalizada para la alternativa correspondiente a la columna en la que nos encontramos que superen o igualen a los valores de la alternativa de la fila de alternativas superior, añadirán al sumatorio de la celda un valor igual al peso ponderado correspondiente al criterio por el cual son comparadas. Esto es, en un problema para tres alternativas, si evaluamos la celda correspondiente a la Alternativa 3 frente a la 2, todos aquellos valores que hayan obtenido mejor o igual valoración para la Alternativa 3, sumarán el valor correspondiente al criterio en el cual han obtenido esta superación.

La correcta lectura de la matriz se hace según lo indicado a continuación:

|   | Alternativa a superar |                 |               |
|---|-----------------------|-----------------|---------------|
| CONCORDANCIA                              | Alternativa 1         | Alternativa 2   | Alternativa 3 |
| Alternativa 1                             |                       |                 |               |
| Alternativa 2                             |                       |                 |               |
| Alternativa de superación → Alternativa 3 |                       | Celda analizada |               |

Ilustración 53: Electre I, Lectura de Matriz

En la ilustración leeremos que la alternativa 3 ha de superar a la 2, para la celda que deseamos analizar.

Una vez hemos construido la Matriz de Concordancia realizado todos los pares de comparaciones según lo establecido, podemos pasar a calcular la Matriz de Discordancia.

#### 4.14.2 Matriz de Discordancia

Para llegar a la Matriz de Discordancia nos apoyaremos en dos matrices intermedias, en las cuales formularemos Numerador y Denominador, a partir de las que construiremos la matriz final.

En primer lugar, para obtener el numerador de este indicador debemos introducir el siguiente bucle dentro de la función MAX(), pues de esta forma obtendremos el máximo valor entre los deseados para aquellos criterios en los que la alternativa de referencia no supera, o es dominada, por la otra alternativa.

$\text{MAX}(\text{SI}(1 < 2; \text{MAX}(1; 2) - \text{MIN}(1; 2); 0); \text{SI}(3 < 4; \text{MAX}(3; 4) - \text{MIN}(3; 4); 0); \text{SI}(\dots$

donde:

- (1) Valor de primera alternativa en el Criterio 1
- (2) Valor de la segunda alternativa para el Criterio 1
- (3) Valor de la primera alternativa en el Criterio 2
- (4) Valor de la segunda alternativa en el Criterio 2

Completando el bucle para todos los criterios y extrayendo el máximo de los valores calculados, obtenemos el Numerador para la posterior construcción de la Matriz de Discordancia. En caso de empate en alguno de los valores calculados, nos fijaremos en el denominador que resulte más restrictivo.

Para calcular el Denominador de la Matriz de Discordancia debemos realizar la máxima diferencia que aparece entre cualesquiera de las dos alternativas que tengo en el numerador, o dicho de otro modo, calculamos la máxima diferencia entre alternativas que aparece en el criterio evaluado. Si lo vemos en una celda de Microsoft Excel ® concreta, tenemos que:

$\text{SI}(1 = (\text{MAX}(2; 3) - \text{MIN}(2; 3)); \text{MAX}(4) - \text{MIN}(4); \text{SI}(1 = (\text{MAX}(5; 6) - \text{MIN}(5; 6)); \text{MAX}(7) - \text{MIN}(7); \text{SI}(\dots$

donde:

- (1) Valor de la celda en el Numerador
- (2) Valor de la Alternativa 1 en el Criterio 1
- (3) Valor de la Alternativa 2 en el Criterio 1
- (4) Rango de alternativas para el Criterio 1
- (5) Valor de la Alternativa 1 en el Criterio 2
- (6) Valor de la Alternativa 2 en el Criterio 2
- (7) Rango de alternativas para el Criterio 2

Continuando el bucle hasta evaluar todos los criterios para la función expresada, obtendremos la máxima diferencia buscada, que representará el Denominador de la Matriz de Discordancia.

Una vez calculados Numerador y Denominador, únicamente nos falta realizar la división entre ambos, para conocer el valor de la discordancia en cada caso. Para ello generamos la Matriz de Discordancia, en la cual dividiremos el Numerador entre el Denominador calculado.

Una vez calculadas las Matrices de Concordancia y Discordancia, podemos realizar la evaluación final de los pares de alternativas que nos ofrecerán información sobre qué alternativas son sobrecalificadas por otras y cuales resultan válidas como respuesta al problema.

Nuevamente, debemos construir otra matriz en la que comparamos las alternativas de forma pareada.

En este momento entran en juego los Umbrales de Concordancia y Discordancia que nos ha facilitado el usuario, pues debemos verificar que se cumplen las siguientes condiciones a la vez, es decir, para que una alternativa sobrecalifique a otra:

- El Índice de Concordancia alcanzado por la comparación de las dos alternativas correspondiente a la celda evaluada, debe ser mayor que el fijado por el usuario.
- El índice de Discordancia entre las alternativas comparadas en la celda que nos situamos, debe ser menor que el introducido por el usuario.

Esto lo comprobamos al implementar el problema mediante la siguiente función, para cada par de alternativas implicadas en una celda:

`SI(Y(1>=2;3<=4);"SOBRECALIFICA";"")`

donde:

- (1) Valor del Índice de Concordancia entre las alternativas comparadas
- (2) Índice de Concordancia dado por usuario
- (3) Valor del Índice de Discordancia calculado entre ambas alternativas
- (4) Índice de Discordancia facilitado por el decisor

Esta función estará anidada dentro de un bucle SI, pues codificaremos tanto la diagonal de matriz como las celdas para las cuales no existan alternativas o criterios como celdas vacías.

Una vez conocemos las relaciones de sobrecalificación entre alternativas, elegiremos como respuesta para el decisor, aquellas alternativas que no resulten

sobre calificadas por otras. Eso lo conseguimos mediante la función CONTAR.SI, pues nos indicará las veces que una alternativa ha resultado sobrecalificada por otra, de forma que aquellas alternativas para las cuales este número sea cero, serán las alternativas válidas para el problema planteado por el decisor con las restricciones introducidas.

En caso de empate entre alternativas, en la matriz final estas aparecerán como sobrecalificadas una sobre la otra y su recíproco, sin embargo, a la hora de conocer si pueden resultar válidas para la resolución del problema realizamos el siguiente ajuste oculto al usuario.

Generamos una matriz de apoyo, en la cual contaremos el número de coincidencias tanto dentro de la Matriz de Concordancia como en la de Discordancia. Si este número es igual, entenderemos que hay empate entre alternativas, con lo cual restaremos este número, es decir, el número de veces que coincidan ambos umbrales, de la función CONTAR.SI antes comentada, de esta forma resolvemos que las situaciones de empate puedan dar como resultado una alternativa no válida, cuando en realidad si lo es.

Si ahora llevamos lo comentado para este método al ejemplo, debemos empezar por definir el tipo de normalización que aplicaremos sobre los datos, fijar los umbrales de Concordancia y Discordancia y asignar pesos a los criterios.



Ilustración 54: Ejemplo Electre I, Elección de normalización y Umbrales

Los umbrales de Concordancia y Discordancia se establecen poco restrictivos para poder comentar más relaciones entre alternativas, pero como sabemos cuánto más restrictivos sean estos, mejores resultados obtendremos con la aplicación del método.

|                    | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |  |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| PESOS              | 3           | 4           | 2           | 7           | 5           | 1           | 8           | 6           |  |
| Pesos normalizados | 0,083333333 | 0,111111111 | 0,055555556 | 0,194444444 | 0,138888889 | 0,027777778 | 0,222222222 | 0,166666667 |  |

Ilustración 55: Ejemplo Electre I, Pesos y Pesos Ponderados

|               | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alternativa 1 | 0,162162162 | 0,188679245 | 0,166666667 | 0,176470588 | 0,184248555 | 0,166666667 | 0,160305344 | 0,165484634 |
| Alternativa 2 | 0,162162162 | 0,188679245 | 0,166666667 | 0,176470588 | 0,184248555 | 0,166666667 | 0,160305344 | 0,165484634 |
| Alternativa 3 | 0,162162162 | 0,141509434 | 0,222222222 | 0,235294118 | 0,140895954 | 0,208333333 | 0,114503817 | 0,24822695  |
| Alternativa 4 | 0,324324324 | 0,330188679 | 0,111111111 | 0,117647059 | 0,158959538 | 0,225       | 0,229007634 | 0,165484634 |
| Alternativa 5 | 0,081081081 | 0,009433962 | 0,155555556 | 0,117647059 | 0,184248555 | 0,183333333 | 0,106870229 | 0,106382979 |
| Alternativa 6 | 0,108108108 | 0,141509434 | 0,177777778 | 0,176470588 | 0,147398844 | 0,05        | 0,229007634 | 0,14893617  |

Ilustración 56: Ejemplo Electre I, Datos normalizados

Una vez contamos con la información requerida para la implementación del método, hemos ponderado los pesos de los atributos y construido la matriz con los datos normalizados según la elección del decisor, pasamos a calcular las Matrices de Concordancia y Discordancia.

· Matriz de Concordancia:

| CONCORDANCIA  | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Alternativa 1 | 1             | 1             | 0,555555556   | 0,555555556   | 0,972222222   | 0,722222222   |
| Alternativa 2 | 1             | 1             | 0,555555556   | 0,555555556   | 0,972222222   | 0,722222222   |
| Alternativa 3 | 0,527777778   | 0,527777778   | 1             | 0,416666667   | 0,861111111   | 0,638888889   |
| Alternativa 4 | 0,611111111   | 0,611111111   | 0,583333333   | 1             | 0,805555556   | 0,75          |
| Alternativa 5 | 0,166666667   | 0,166666667   | 0,138888889   | 0,388888889   | 1             | 0,166666667   |
| Alternativa 6 | 0,472222222   | 0,472222222   | 0,472222222   | 0,472222222   | 0,833333333   | 1             |

Ilustración 57: Ejemplo Electre I, Matriz de Concordancia

Como vemos (Ilustración 57) la diagonal de la matriz siempre se corresponderá con la unidad, pues esto también ha sido codificado. Por otro lado, si queremos comprobar que hemos realizado correctamente la programación de la matriz nos centramos en un caso concreto.

Por ejemplo, si queremos evaluar el Índice de Concordancia de la Alternativa 4 frente a la 3, es decir  $C_{C43}$ , debemos evaluar la relación entre todos los atributos de ambas alternativas para ver en cuales la Alternativa 4 supera a la 3, comprobamos esto con la siguiente tabla:

|               | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Alternativa 3 | 0,162162162 | 0,141509434 | 0,222222222 | 0,235294118 | 0,140895954 | 0,208333333 | 0,114503817 | 0,24822695  |
| Alternativa 4 | 0,324324324 | 0,330188679 | 0,111111111 | 0,117647059 | 0,158959538 | 0,225       | 0,229007634 | 0,165484634 |

Ilustración 58: Ejemplo Electre I, Índice de Concordancia 43

Como vemos (Ilustración 58) en los criterios 1, 2, 5, 6 y 7, la Alternativa 4 supera a la 3, con lo cual serán los pesos ponderados de estos los que formarán el Índice de Concordancia,  $C_{C43}$ .

$$C_{C43} = 0,027777778 + 0,055555556 + 0,083333333 + 0,111111111 + 0,138888889 + 0,166666667 = 0,583333333$$

· Matriz de Discordancia:

En este caso, como hemos expresado antes, hemos construido la Matriz de Discordancia a partir de Numerador y Denominador de forma independiente, para luego generar el índice.

Con lo cual, en el primer caso tenemos el Numerador, en el que, si volvemos a comprobar la relación de la Alternativa 4 con la 3, tenemos que evaluar aquellos valores en los cuales la Alternativa 4 este dominada por la 3, dicho de otro modo, aquellos atributos en los cuales la Alternativa 3 supere a la cuatro, y calcular la diferencia entre ambos. Lo comprobamos en la siguiente tabla:

|               | Criterio 1   | Criterio 2   | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5   | Criterio 6   | Criterio 7   | Criterio 8  |  |
|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--|
| Alternativa 3 | 0,162162162  | 0,141509434  | 0,222222222 | 0,235294118 | 0,140895954  | 0,208333333  | 0,114503817  | 0,24822695  |  |
| Alternativa 4 | 0,324324324  | 0,330188679  | 0,111111111 | 0,117647059 | 0,158959538  | 0,225        | 0,229007634  | 0,165484634 |  |
|               | -0,162162162 | -0,188679245 | 0,111111111 | 0,117647059 | -0,018063584 | -0,016666667 | -0,114503817 | 0,082742317 |  |

Ilustración 59: Ejemplo Electre I, Selección de Numerador

En la tabla (Ilustración 59) hemos realizado la diferencia de los valores de la Alternativa 3 menos los de la 4, y de entre ellos hemos seleccionado el mayor obtenido. Comprobamos que este valor se corresponde con el que aparece en la matriz de Numerador.

| NUMERADOR     | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 | 0             | 0             | 0,082742317   | 0,162162162   | 0,016666667   | 0,06870229    |  |
| Alternativa 2 | 0             | 0             | 0,082742317   | 0,162162162   | 0,016666667   | 0,06870229    |  |
| Alternativa 3 | 0,047169811   | 0,047169811   | 0             | 0,188679245   | 0,043352601   | 0,114503817   |  |
| Alternativa 4 | 0,058823529   | 0,058823529   | 0,117647059   | 0             | 0,044444444   | 0,066666667   |  |
| Alternativa 5 | 0,179245283   | 0,179245283   | 0,141843972   | 0,320754717   | 0             | 0,132075472   |  |
| Alternativa 6 | 0,116666667   | 0,116666667   | 0,158333333   | 0,216216216   | 0,133333333   | 0             |  |

Ilustración 60: Ejemplo Electre I, Submatriz de Numerador

Ahora pasamos a calcular el Denominador de la matriz de Discordancia. Para ello debemos fijarnos en el Numerador, pues nos indica el criterio en el cual hemos alcanzado la máxima diferencia de superación de la Alternativa 4 frente a la 3. Con ello calculamos la máxima diferencia dentro del atributo, es decir, debemos calcular la máxima diferencia para, es este caso, el Criterio 4.

| Criterio 4  |
|-------------|
| 0,176470588 |
| 0,176470588 |
| 0,235294118 |
| 0,117647059 |
| 0,117647059 |
| 0,176470588 |
| 0,117647059 |

Ilustración 61: Ejemplo Electre I, Cálculo de Denominador

Comprobamos que dicha diferencia concuerda con el valor correspondiente en la submatriz Denominador.

| DENOMINADOR   | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 | 0             | 0,243243243   | 0,223805701   | 0,243243243   | 0,175         | 0,122137405   |  |
| Alternativa 2 | 0,243243243   | 0             | 0,223805701   | 0,243243243   | 0,175         | 0,122137405   |  |
| Alternativa 3 | 0,320754717   | 0,320754717   | 0             | 0,320754717   | 0,043352601   | 0,122137405   |  |
| Alternativa 4 | 0,117647059   | 0,117647059   | 0,117647059   | 0             | 0,111111111   | 0,111111111   |  |
| Alternativa 5 | 0,320754717   | 0,320754717   | 0,223805701   | 0,320754717   | 0             | 0,320754717   |  |
| Alternativa 6 | 0,175         | 0,175         | 0,175         | 0,243243243   | 0,175         | 0             |  |

Ilustración 62: Ejemplo Electre I, Submatriz de Denominador

Una vez calculados Numerador y Denominador, realizamos la fracción entre ambos para obtener la Matriz de Discordancia. Para el ejemplo que estamos evaluando tenemos:

$$C_{D43} = \frac{0,117647059}{0,117647059} = 1$$

Lo cual se corresponde con el valor que nos muestra la celda correspondiente en la Matriz de Discordancia.

| DISCORDANCIA  | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 | 0             | 0             | 0,369706029   | 0,666666667   | 0,095238095   | 0,5625        |  |
| Alternativa 2 | 0             | 0             | 0,369706029   | 0,666666667   | 0,095238095   | 0,5625        |  |
| Alternativa 3 | 0,147058824   | 0,147058824   | 0             | 0,588235294   | 1             | 0,9375        |  |
| Alternativa 4 | 0,5           | 0,5           | 1             | 0             | 0,4           | 0,6           |  |
| Alternativa 5 | 0,558823529   | 0,558823529   | 0,633781764   | 1             | 0             | 0,411764706   |  |
| Alternativa 6 | 0,666666667   | 0,666666667   | 0,904761905   | 0,888888889   | 0,761904762   | 0             |  |

Ilustración 63: Ejemplo Electre I, Matriz de Discordancia

Dado que ya hemos generado los Índices de Concordancia y Discordancia para todos los pares de alternativas, podemos pasar a comprobar, según los umbrales marcados, que relaciones son suficientemente fuertes para expresar sobre calificación entre alternativas.

Aunque los umbrales establecidos no sean tan restrictivos como sería deseable, comprobamos sobre la matriz (Ilustración 64) que alternativas resultarán sobre calificadas.

|               | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 |               | SOBRECALIFICA |               |               | SOBRECALIFICA |               |  |
| Alternativa 2 | SOBRECALIFICA |               |               |               | SOBRECALIFICA |               |  |
| Alternativa 3 |               |               |               |               |               |               |  |
| Alternativa 4 | SOBRECALIFICA | SOBRECALIFICA |               |               | SOBRECALIFICA |               |  |
| Alternativa 5 |               |               |               |               |               |               |  |
| Alternativa 6 |               |               |               |               |               |               |  |
|               | 1             | 1             | 0             | 0             | 3             | 0             |  |

Ilustración 64: Ejemplo Electre I, Matriz de Sobre calificación

El caso de sobrecalificación de la Alternativa 1 con la 2 y su recíproca se produce porque ambas alternativas han resultado empatas, sin embargo, esto no hace que no puedan ser elegidas como válidas.

Si nos centramos en un caso concreto, para comprobar que las relaciones establecidas son correctas, tenemos lo siguiente para la sobrecalificación de la Alternativa 4 sobre la 1.

En la Matriz de Concordancia hemos obtenido,  $C_{C41} = 0,666666667$ , lo cual es mayor que el umbral establecido  $C = 0,6$ .

Y si evaluamos la Matriz de Discordancia tenemos,  $C_{D41} = 0,5$ , que iguala al valor dado  $D = 0,5$ .

Con lo que podemos afirmar que se cumple la relación de sobrecalificación de la Alternativa 4 sobre la 1.

Finalmente, establecemos que alternativas resultan válidas como solución a nuestro problema, pues no son sobrecalificadas por ninguna otra. Para ello nos fijamos en la última línea de la matriz final anterior, pues en ella toda alternativa que sume más de cero mediante la función `CONTAR.SI`, resultará sobre calificada y no será válida.

| ACEPTABLES    |
|---------------|
|               |
|               |
| Alternativa 3 |
| Alternativa 4 |
|               |
| Alternativa 6 |
|               |

Ilustración 65: Ejemplo Electre I, Alternativas aceptables

Como hemos comentado al explicar la formulación, los empates son resueltos mediante una sencilla matriz, que en este caso se muestra de la siguiente manera (Ilustración 66):

| Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| 1             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             |  |
| 1             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             |  |
| 1             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             |  |

Ilustración 66: Ejemplo Electre I, Casos de empate

En la primera fila se representa el número de veces que resulta empatado el Índice de Concordancia entre alternativas, en la segunda la igualdad para el Índice de

Discordancia, y finalmente el número de veces que se produce tal igualdad. Como podemos ver, al producirse empate entre las Alternativas 1 y 2, en la última fila de esta matriz tenemos como resultado 1. Este dato será restado a la última columna de la matriz final, es decir, de esta forma logramos que el empate no sea contabilizado en la resolución de alternativas válidas para el problema.

#### 4.15 Promethee I y II

En la última hoja del archivo de Microsoft Excel ® encontramos los métodos *Promethee I y II*, estos requieren la misma información por parte del usuario y la implementación se realiza de forma conjunta en ambos, separándose al realizar la elección de alternativas final que mostraremos al decisor.

Para la aplicación de este método debemos conocer el orden de importancia relativa de los atributos, para ello el usuario debe proporcionarnos los pesos, que luego ponderaremos mediante la división de cada valor facilitado por el usuario, entre la suma total de dichos valores.

En esta metodología el decisor debe seleccionar, para cada uno de los atributos que forman el problema, un filtro de entre los seis comentados en el Capítulo 3, y en caso de ser necesario establecer los umbrales pertinentes. La elección de dicho filtro se ha facilitado al decisor mediante una lista desplegable en la cual figurarán las opciones disponibles.



Ilustración 67: Promethee, Filtros

Cuando el decisor nos ha proporcionado la información necesaria sobre los atributos, podemos llevar a cabo la aplicación del método.

En primer lugar, construimos una matriz para cada uno de los atributos del problema, en la cual realizaremos la comparación de pares de alternativas. Esta comparación nos proporcionará la diferencia entre la alternativa de la columna menos la alternativa de la fila, recordamos que siempre comenzamos leyendo la matriz desde la columna situada a la izquierda de la matriz. Los datos a partir de los

cuales realizamos esta diferencia son los proporcionados por el usuario en la hoja *Datos* que son convertidos en criterios crecientes en la hoja *Normalización*.

El filtro elegido por el usuario será aplicado sobre estas matrices generadas por la diferencia de valores de las alternativas. Este proceso nos proporcionará nuevamente otra matriz para cada atributo, pero este proceso ha sido empleado para la normalización de los valores obtenidos en la primera.

La formulación que emplearemos para la implementación de este paso es la siguiente en cada dato:

```
SI(1="";";
SI(2="Natural";SI(1>0;1;0);SI(2="U";SI(1>=3;1;0);
SI(2="V";SI(1>=4;1;SI(1<=0;0;1/4));
SI(2="Dos niveles";SI(1<3;0;SI(Y(1<4;1>=3);0,5;1));
SI(2="V área int";SI(1<=3;0;SI(Y(1>3;1<=4);(1/(4-3))*(1-3);1);""))))
```

donde:

- (1) Diferencia resultante de la evolución de las alternativas para un mismo criterio
- (2) Filtro seleccionado por el usuario
- (3) Umbral inferior
- (4) Umbral superior

Con las comparaciones normalizadas de las alternativas según el filtro elegido por el usuario para cada atributo pasamos a realizar una matriz resumen, en la que nos apoyaremos para realizar las ordenaciones finales de los métodos Promethee I y II.

En cada celda conseguimos la comparación de dos alternativas, según el sumatorio de la formulación:

$$SI(ESNUMERO(1*2);1*2;0)+....$$

- (1) Dato normalizado para la comparación de alternativas en el criterio evaluado
- (2) Peso ponderado para el criterio evaluado

Una vez completada la matriz de comparación de pares de alternativas en todos sus criterios, podemos a pasar a construir los vectores de flujo que emplearemos para la elección final de los métodos.

Tendremos los tres vectores expresados a continuación:

· Vector flujo positivo: calculado según  $SI(1="" ; "" ; SUMA(2) / (CONTAR(2) - 1))$

· Vector flujo negativo:  $SI(1="" ; "" ; SUMA(3) / (CONTAR(3) - 1))$

donde:

(1) Alternativa evaluada

(2) Rango de alternativa columna

(3) Rango de alternativa fila

· Vector flujo neto: resultante de la diferencia entre el flujo positivo menos el negativo. Sobre el dato obtenido aplicamos el termino correctivo en caso de empate, restando  $0,00000000001x$  "Numero de veces que ha aparecido dicho valor".

En este punto se separan las dos metodologías implementadas para el método Promethee.

#### 4.15.1 Promethee I

Por un lado, tenemos el método Promethee I, con el que tratamos de establecer las relaciones existentes entre alternativas. Con lo cual presentaremos al decisor una matriz con las relaciones de Preferencia, Preferencia Inversa, Indiferencia o Incomparabilidad entre alternativas.

La respuesta para cada relación se obtiene mediante la formulación:

```
SI(O(Y(1>=2;3<4);Y(1>2;3<=4));"PREFERENCIA";  
SI(O(Y(1<=2;3>4);Y(1<2;3>=4));"PREFERENCIA INVERSA";  
SI(Y(1=2;3=4);"INDIFERENCIA";  
"INCOMPARABILIDAD"))))
```

donde:

(1) Flujo positivo de la Alternativa de la columna izquierda

(2) Flujo positivo de la Alternativa de la fila superior

(3) Flujo negativo de la Alternativa de la columna izquierda

(4) Flujo negativo de la Alternativa de la fila superior

Teniendo en cuenta que las celdas de la diagonal de la matriz o las que se encuentren en posiciones en las cuales no exista alternativa han sido codificadas como vacías.

#### 4.15.2 Promethee II

Para la segunda variante del método Promethee, Promethee II, realizaremos la ordenación de alternativas según su orden de preferencia, mediante el flujo neto calculado. Esto lo realizamos a partir de la función K.ESIMO.MAYOR, ya comentada en otros métodos.

Ahora aplicaremos la implementación realizada al caso evaluado a lo largo de trabajo.

Comenzamos asignando pesos a los atributos:

|                  | Criterio 1  | Criterio 2  | Criterio 3  | Criterio 4  | Criterio 5  | Criterio 6  | Criterio 7  | Criterio 8  |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PESOS            | 4           | 7           | 1           | 2           | 6           | 8           | 5           | 3           |
| PESOS PONDERADOS | 0,111111111 | 0,194444444 | 0,027777778 | 0,055555556 | 0,166666667 | 0,222222222 | 0,138888889 | 0,083333333 |

Ilustración 68: Ejemplo Promethee, Pesos y Pesos Ponderados

A continuación, elegimos los filtros que deseamos aplicar a cada uno de los criterios y definimos los umbrales necesarios.

|                         |                   |                   |                   |                   |             |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| <b>PROMETHEE I y II</b> | <b>Criterio 3</b> |                   | <b>Criterio 6</b> |                   |             |
|                         | Filtro            | V área int        | Filtro            | V                 |             |
|                         | Umbrales          | 14   27           | Umbrales          | 2                 |             |
| <b>Criterio 1</b>       |                   | <b>Criterio 4</b> |                   | <b>Criterio 7</b> |             |
| Filtro                  | Natural           | Filtro            | U                 | Filtro            | Dos niveles |
| Umbrales                |                   | Umbrales          | 1                 | Umbrales          | 2   4       |
| <b>Criterio 2</b>       |                   | <b>Criterio 5</b> |                   | <b>Criterio 8</b> |             |
| Filtro                  | Dos niveles       | Filtro            | Natural           | Filtro            | Natural     |
| Umbrales                | 1   3             | Umbrales          |                   | Umbrales          |             |

Ilustración 69: Ejemplo Promethee, Elección de Filtros

Si tomamos como ejemplo el Criterio 3, tenemos que la matriz de diferencias entre alternativas para este criterio según los datos del problema queda (Ilustración 70):

| <b>Criterio 3</b> | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1     | 0             | 0             | -25           | 25            | 5             | -5            |  |
| Alternativa 2     | 0             | 0             | -25           | 25            | 5             | -5            |  |
| Alternativa 3     | 25            | 25            | 0             | 50            | 30            | 20            |  |
| Alternativa 4     | -25           | -25           | -50           | 0             | -20           | -30           |  |
| Alternativa 5     | -5            | -5            | -30           | 20            | 0             | -10           |  |
| Alternativa 6     | 5             | 5             | -20           | 30            | 10            | 0             |  |

Ilustración 70: Ejemplo Promethee, Matriz de diferencias

Con lo cual, como el filtro elegido para este criterio es el de V con área interior tenemos que la matriz con los datos normalizados se presenta de la siguiente forma (Ilustración 71):

| <b>V área int</b> | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1     | 0             | 0             | 0             | 0,846153846   | 0             | 0             |  |
| Alternativa 2     | 0             | 0             | 0             | 0,846153846   | 0             | 0             |  |
| Alternativa 3     | 0,846153846   | 0,846153846   | 0             | 1             | 1             | 0,461538462   |  |
| Alternativa 4     | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |  |
| Alternativa 5     | 0             | 0             | 0             | 0,461538462   | 0             | 0             |  |
| Alternativa 6     | 0             | 0             | 0             | 1             | 0             | 0             |  |

Ilustración 71: Ejemplo Promethee, Aplicación de filtro

Como podemos observar los valores que se encuentran por debajo del umbral inferior, en este caso 14, adquieren una valoración de 0, los que sobrepasan el umbral superior, 27, tienen un 1, y aquellos que se encuentran entre ambos umbrales tenemos crecen linealmente a medida que se acercan al umbral superior.

Una vez hemos normalizado todos los valores de las matrices de diferencias de alternativas según el filtro impuesto para cada uno de ellos, pasamos a calcular la tabla que resumirá las relaciones, en valores numéricos, de las alternativas.

Como ya sabemos en esta tabla realizamos el sumatorio de los productos obtenidos a partir de la valoración normalizada de cada par de alternativas en todos los criterios, con peso ponderado del criterio mediante el cual están siendo evaluadas en ese momento. Con ello obtenemos lo siguiente (Ilustración 72):

|               | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | Alternativa 4 | Alternativa 5 | Alternativa 6 |  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--|
| Alternativa 1 | 0,222222222   | 0,222222222   | 0,263888889   | 0,245726496   | 0,444444444   | 0,680555556   |  |
| Alternativa 2 | 0,222222222   | 0,222222222   | 0,263888889   | 0,245726496   | 0,444444444   | 0,680555556   |  |
| Alternativa 3 | 0,384615385   | 0,384615385   | 0,222222222   | 0,166666667   | 0,597222222   | 0,485042735   |  |
| Alternativa 4 | 0,527777778   | 0,527777778   | 0,694444444   | 0,222222222   | 0,611111111   | 0,777777778   |  |
| Alternativa 5 | 0,222222222   | 0,222222222   | 0,166666667   | 0,179487179   | 0,222222222   | 0,388888889   |  |
| Alternativa 6 | 0             | 0             | 0,166666667   | 0,083333333   | 0,347222222   | 0,222222222   |  |

Ilustración 72: Ejemplo Promethee, Comparación de Alternativas

Gracias a la tabla intermedia anterior, que resume las relaciones entre alternativas, calculamos los flujos (Ilustración 73):

|               | $\phi^+$   | $\phi^-$   | $\phi$      |
|---------------|------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 | 0,41581197 | 0,31581197 | 0,1         |
| Alternativa 2 | 0,41581197 | 0,31581197 | 0,1         |
| Alternativa 3 | 0,44807692 | 0,35555556 | 0,09252137  |
| Alternativa 4 | 0,67222222 | 0,22863248 | 0,44358974  |
| Alternativa 5 | 0,28034188 | 0,53333333 | -0,25299145 |
| Alternativa 6 | 0,16388889 | 0,64700855 | -0,48311966 |

Ilustración 73: Ejemplo Promethee, Flujos

Finalmente, debemos presentar al usuario una solución para el problema planteado. Como sabemos, en esta metodología puede hacerse de varias formas y a lo largo de este Trabajo Fin de Grado hemos desarrollado dos de ellas, Promethee I y II.

Para el Promethee I, en este ejemplo proporcionaremos la siguiente matriz (Ilustración 74) en la cual puedan verse las preferencias establecidas entre alternativas.

Como podemos observar, las alternativas 1 y 2 resultan empatadas, con lo que se establece entre ellas una relación de Indiferencia. Encontramos una relación de Preferencia de la Alternativa 4 frente a la 1, pues el flujo positivo es mayor y el flujo negativo es menor para esta alternativa, Alternativa 4, frente a la 1. La Alternativa 3 y 1 resultan Incomparables, dado que ambos flujos son superiores para la Alternativa 3, no podemos establecer ninguna relación de preferencia. El último caso, es decir, Preferencia Inversa, se da por ejemplo entre la Alternativa 5 y la 4, pues el flujo positivo es más bajo en la Alternativa 5, y el negativo es más alto para esta misma alternativa.

|               | Alternativa 1       | Alternativa 2       | Alternativa 3       | Alternativa 4       | Alternativa 5       | Alternativa 6 |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| Alternativa 1 |                     | INDIFERENCIA        | INCOMPARABILIDAD    | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA         | PREFERENCIA   |
| Alternativa 2 | INDIFERENCIA        |                     | INCOMPARABILIDAD    | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA         | PREFERENCIA   |
| Alternativa 3 | INCOMPARABILIDAD    | INCOMPARABILIDAD    |                     | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA         | PREFERENCIA   |
| Alternativa 4 | PREFERENCIA         | PREFERENCIA         | PREFERENCIA         |                     | PREFERENCIA         | PREFERENCIA   |
| Alternativa 5 | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA INVERSA | PREFERENCIA INVERSA |                     | PREFERENCIA   |
| Alternativa 6 | PREFERENCIA INVERSA |               |

Ilustración 74: Promethee I, Solución

Si el decisor desea conocer la jerarquización de las alternativas, entonces el modelo que implementaremos será el Promethee II. Ahora realizaremos la ordenación de las alternativas mediante la función K.ESIMO.MAYOR, como hemos realizado en métodos anteriores.

En este caso la corrección en caso de empates, como se produce en las alternativas 1 y 2, se realiza durante el cálculo del flujo neto, de forma que, si el flujo positivo coincide para dos o más alternativas, iremos restando al flujo neto la cantidad de  $0,00000000001 \times$  "El número de veces que ha aparecido a esa alternativa un valor igual".

Con estos criterios, obtenemos el Orden de Elección Final que se muestra en la siguiente tabla (Ilustración 75):

| PROMETHEE II      |              |
|-------------------|--------------|
| ORDEN DE ELECCIÓN | VALORACIÓN   |
| Alternativa 4     | 0,443589744  |
| Alternativa 1     | 0,1          |
| Alternativa 2     | 0,1          |
| Alternativa 3     | 0,092521368  |
| Alternativa 5     | -0,252991453 |
| Alternativa 6     | -0,483119658 |
|                   |              |

Ilustración 75: Promethee II, Ejemplo Solución

## 5 MANUAL DE USUARIO

### 5.1 Presentación

En este apartado se describirán los objetivos e información necesaria para utilizar el archivo de Microsoft Excel ® en el cual se ha llevado a cabo la implementación de los métodos de ayuda a la toma de decisión multiatributo desarrollados en el presente Trabajo Fin de Grado.

Uno de los objetivos más relevantes de este proyecto radica en proporcionar al decisor una matriz (Ilustración 80) en la cual un usuario pueda plantear un problema concreto de hasta 10 alternativas y 15 criterios, y obtener mediante el programa implementado en Microsoft Excel ® una solución que le facilite la toma de decisión mediante diversas metodologías multiatributo. Con lo cual es primordial presentar de forma clara y concisa ante del decisor el funcionamiento de esta herramienta.

### 5.2 Introducción de datos

Una vez que el usuario ha abierto la hoja de cálculo denominada TFG\_TOMA DE DECISION.xlsx dentro del software de Microsoft Excel ®, podrá visualizar una pantalla, hoja *Datos*, en la que debe introducir los datos que previamente ha debido analizar y clasificar en el programa. La forma de introducir los datos propuesta se basa en una matriz, en la cual insertará la lista de posibles alternativas en la columna vertical dispuesta a la izquierda de la matriz y los atributos en base a los cuales tomará la decisión final en la fila superior de dicha matriz.

Debemos reseñar que, puesto que sabemos que no todos los criterios han de ser crecientes, se ha habilitado una lista desplegable, por medio de la cual el usuario seleccionará para criterio si este es creciente o decreciente.

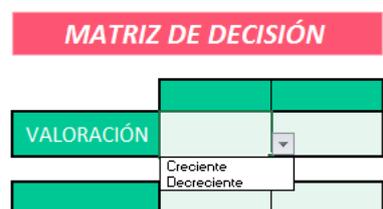


Ilustración 76: Tipo de criterio

Del mismo modo y una vez introducida la clasificación de los criterios según estos sean Crecientes o Decrecientes, tenemos una nueva lista despegable en la que el decisor establecerá el tipo de conversión que desea aplicar a los mismos, con el fin de convertir todos los criterios en crecientes para la posterior implementación de las metodologías.



Ilustración 77: Conversión de criterios

Todos los datos introducidos en el problema deben ser valores numéricos, por lo cual, si alguno de los criterios se encuentra en una escala cualitativa, antes de comenzar el problema deberá transformarlos según la valoración de la alternativa dentro del criterio a una escala cuantitativa.

Si el decisor por error intenta introducir en el programa un dato no numérico o un valor negativo, el programa devolverá una ventana que le indique el tipo de dato a introducir (Ilustración 78).

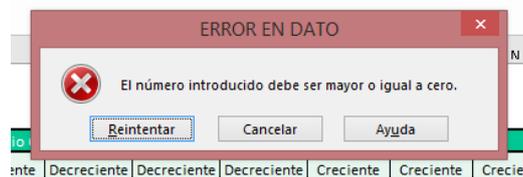


Ilustración 78: Introducción de datos

Tras introducir los valores de las alternativas para cada criterio y fijar la información requerida en esta hoja, el usuario debe pulsar sobre la flecha (Ilustración 79) para realizar la elección del método de ayuda a la Toma de Decisión.



Ilustración 79: Paso de hoja



### 5.3 Elección de método

Cuando el usuario presiona la flecha llamada *MÉTODO*, pasa a la segunda hoja del programa en la cual se presentan las posibles metodologías a implementar. En esta hoja se seleccionará el método que más tarde proporcionará solución al problema que el usuario desea resolver.

Aquí podemos encontrar un breve resumen de la solución que cada método proporcionará. Cuando se ha elegido el método a implementar para el problema, el decisor debe clicar sobre el nombre de dicha metodología.

A continuación se muestran los posibles métodos para la resolución del problema planteado, seleccione uno de ellos haciendo click en el nombre.

|   |   |
|---|---|
|  <b>DOMINANCIA</b> | Propone una lista con aquellas alternativas que resulten dominantes en los criterios establecidos.  |
|  <b>MAX-MIN</b>    | La respuesta será una tabla con las alternativas en las que pueda ser hallada la valoración máxima entre los mínimos para cada alternativa. |
|  <b>MAX-MAX</b>    | La respuesta será una tabla con las alternativas en las que pueda ser hallada la valoración máxima entre los máximos para cada alternativa. |
|  <b>CONJUNTIVO</b> | Se mostrará como resultado una lista en la cual aparecen las alternativas que superan un umbral establecido en todos sus atributos.         |

Ilustración 81: Elección de Método

Una vez introducidos los datos en el problema y seleccionado el método por el cual conoceremos la solución del mismo, pasamos a la hoja en la cual se encuentra la metodología a implantar.

### 5.4 Dominancia

Si seleccionamos este método para resolver el problema planteado obtendremos una lista con aquellas alternativas que resulten dominantes en los criterios establecidos. Es decir, la decisión final de una única alternativa debe ser tomada por el usuario, pues podemos obtener que varias de las expuestas resuelvan el problema.

En la matriz intermedia se muestran las relaciones de dominancia entre pares de alternativas, es decir, si alguna alternativa es dominada por otra, en esta matriz quedara reflejado. Esta matriz, como todas las desarrolladas a lo largo del trabajo, deben leerse desde la columna ubicada a la izquierda de la matriz, cruzando por la celda seleccionada, hasta la fila superior de alternativas, en este caso, de la matriz.

En este caso no se requiere información adicional a la ya introducida anteriormente.

### 5.5 Max-Min

En este segundo método de toma de decisión el usuario debe seleccionar la manera de normalizar los datos entre las cuatro posibles alternativas, que anteriormente han sido descritas, mediante una lista desplegable.

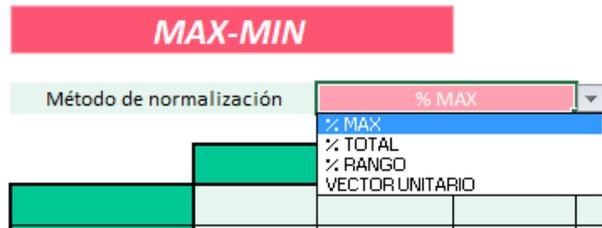


Ilustración 82: Max-Min, Normalización

En la matriz donde se muestran los datos de la normalización elegida dentro de esta hoja, podremos apreciar destacados en amarillo, el mínimo dato que obtiene cada alternativa dentro de las valoraciones dadas para cada criterio. Esta aclaración resulta interesante, pues el máximo de estos mínimos señalados nos proporcionará la elección final para el problema.

Para comprobar que dicho máximo se corresponde con el valor correcto dentro de los mínimos seleccionados, el usuario dispone de una celda en la que se muestra este dato. Junto a ella, en una columna denominada como el método, *Max-Min*, se muestra la alternativas o alternativas que se correspondan con dicho valor, siendo estas la solución propuesta en este caso al problema propuesto.

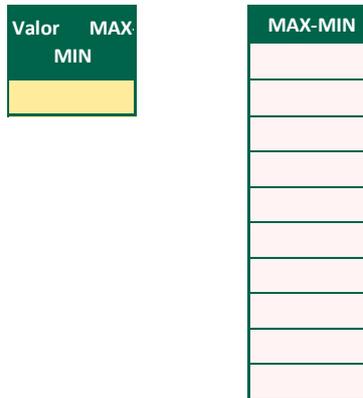


Ilustración 83: Max-Min, Solución

### 5.6 Max-Max

Si la metodología seleccionada ha sido la Max-Max, el problema nos devolverá como respuesta la alternativa o alternativas en las cuales encontremos el máximo de los máximos de cada alternativa alcanzado en los criterios sobre los cuales han sido evaluadas cada una de ellas.



ser numérico y positivo en todos los casos, si el decisor introduce un dato que no cumple dicha condición, el programa devuelve (Ilustración 86):

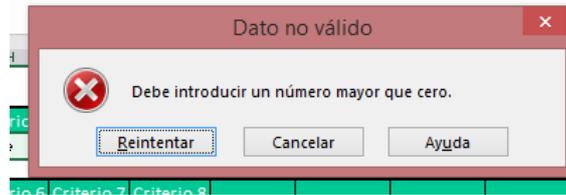


Ilustración 86:Error en introducción de umbrales

La línea reservada para que el decisor pueda establecer los umbrales se presenta como el siguiente ejemplo.

|                               |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>CONJUNTIVO</b>             |            |            |            |            |            |            |
| NIVEL DE DECISIÓN DEL USUARIO |            |            |            |            |            |            |
|                               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 |
| PESOS                         |            |            |            |            |            |            |

Ilustración 87: Conjuntivo, Asignación de Umbrales

El usuario debe ser consciente que en caso de que el criterio introducido sea decreciente, los valores que resultarán válidos de las alternativas para ese criterio serán aquellos que se encuentren por debajo del umbral establecido. Si el criterio es creciente, los valores deben superar el umbral.

Con los límites establecidos, podemos ver en la matriz Alternativas-Criterios presentada, los criterios en los cuales cada alternativa si alcanza el valor mínimo establecido.

Como solución al problema y con la matriz comentada, podemos observar (Ilustración 88) una columna en la que se muestren aquellas alternativas que resulten buenas como solución al problema, o dicho de otro modo, aquellas alternativas que en todos sus criterios alcancen el umbral establecido.

|  | ACEPTABLES | NO ACEPTABLES |
|--|------------|---------------|
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |

Ilustración 88: Conjuntivo, Solución

### 5.8 Disyuntivo

Si el método seleccionado es el Disyuntivo, llegamos a una matriz en la cual se muestra la superación de los atributos de igual forma que en el apartado anterior. Con lo que, el usuario debe establecer unos umbrales mínimos de superación, con datos numéricos positivos, siendo en este caso válida toda alternativa que supere en al menos un criterio el umbral establecido.

|                               |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>DISYUNTIVO</b>             |            |            |            |            |            |            |
| NIVEL DE DECISIÓN DEL USUARIO |            |            |            |            |            |            |
|                               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 |
| PESOS                         |            |            |            |            |            |            |

Ilustración 89: Disyuntivo, Asignación de Umbrales

En la matriz se muestran nuevamente los atributos en los cuales cada alternativa supera las características mínimas impuestas por el decisor.

Con ello seleccionamos las alternativas que resultarán válidas para la resolución del problema implementado, estas serán todas las que en al menos un criterio alcancen el umbral establecido, y se muestran de la siguiente manera (Ilustración 90):

|  | ACEPTABLES | NO ACEPTABLES |
|--|------------|---------------|
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |
|  |            |               |

Ilustración 90: Disyuntivo, Solución

### 5.9 Lexicográfico

Cuando el usuario decide que el mejor método para obtener una solución del problema multiatributo es el lexicográfico, debe ser consciente que además de los valores de los criterios en las alternativas, deberá facilitarnos el orden de preferencia de los criterios.

Para proporcionarnos dicho orden, la hoja de Microsoft Excel ® cuenta con una línea en la cual podrán ser introducidos valores numéricos, permitiéndose números decimales y no correlativos. Como en los casos anteriores el número introducido debe ser mayor que cero, sino el problema devolverá mensaje de error. En este método la valoración de los criterios no puede ser igual en ningún caso.

| LEXICOGRÁFICO |            |            |            |            |            |            |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 |
| PESOS         |            |            |            |            |            |            |

Ilustración 91: Lexicográfico, Asignación de Pesos

Una vez asignados los pesos a los atributos, podemos comprobar que los criterios aparecen ordenados en la matriz según la importancia asignada por el decisor. Gracias a la referencia generada para los criterios y la lista de alternativas vemos como ahora la matriz contiene los datos transformados ya todos los criterios en crecientes y ordenados en columnas según la jerarquía establecida en los criterios.

A partir de esta matriz se establecerá la ordenación final de las alternativas, que se mostrará en una columna anexa denominada *Orden de Decisión* (Ilustración 92). Como ya sabemos, en este método la primera alternativa seleccionada será aquella que más valoración alcance en el criterio más relevante para el decisor, y así sucesivamente hasta llegar a la alternativa que peor resultado tenga en dicho criterio. En caso de empate entre dos alternativas debemos mirar el siguiente atributo más valorado, y si este empate persiste iremos valorando dichas alternativas hasta que en algún criterio tomen valores diferentes.

| ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN |
|-------------------|------------|
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |

Ilustración 92: Lexicográfico, Solución

### 5.10 Suma Ponderada

Si el decisor decide implementar el problema a partir del método Suma Ponderada, además de los datos aportados en la hoja de datos deberá, en esta página, elegir el método de normalización y asignar los pesos a los criterios.

La elección de método de normalización se realizará como en apartados anteriores, según una lista desplegable. Para la asignación de pesos contamos con una línea reservada para ello, en la cual el decisor únicamente podrá introducir valores numéricos positivos.



Ilustración 93: Suma Ponderada, Normalización y Pesos

Con ello podemos ver como las alternativas son valoradas mediante la realización de la suma ponderada de los datos proporcionados, y como al implementar esta columna de datos numéricos obtenemos la ordenación final de las alternativas en la columna *Orden de Decisión* (Ilustración 94).

|  | VALORACIÓN |
|--|------------|
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |
|  |            |

| ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN |
|-------------------|------------|
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |

Ilustración 94: Suma ponderada, Solución

### 5.11 Producto Ponderado

En este método el usuario debe aportarnos la siguiente información, tras habernos proporcionado ya los datos pedidos en la Matriz de Decisión. Por un lado, debe elegir el método de normalización de las alternativas entre los cuatro posibles mediante una lista desplegable, y además debe facilitarnos los pesos de los atributos, que luego han de ser ponderados.

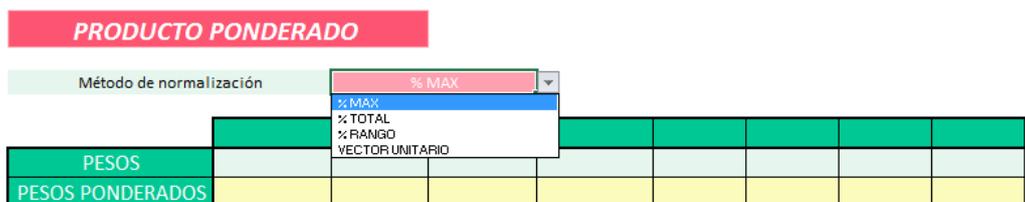


Ilustración 95: Producto Ponderado, Normalización y Pesos

En este caso las celdas en color  están dedicadas a la introducción de pesos por el usuario, y las que han sido coloreadas en  muestran el peso ponderado de cada criterio. Los pesos asignados deben ser, como en otros métodos, números positivos, sino es muestra una ventana de error como recordatorio.

Podemos observar que con la información proporcionada llegamos a establecer las valoraciones propias de cada alternativa que nos permiten la ordenación final de las mismas. En esta columna podremos comprobar que es correcta la jerarquización final, pues las alternativas que obtengan datos mayores en esta columna serán las primeras propuestas como solución al decisor.

La clasificación final del usuario en base a la jerarquización de los atributos establecida y las valoraciones dadas a las alternativas en ellos, se muestra en la columna *Orden de Decisión* (Ilustración 96).

|  |  | VALORACIÓN |
|--|--|------------|
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |
|  |  |            |

| ORDEN DE DECISIÓN | VALORACIÓN |
|-------------------|------------|
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |

Ilustración 96: Producto Ponderado, Solución

### 5.12 Asignación Lineal

Si el método seleccionado para la ayuda a la resolución del problema planteado por el usuario resulta ser Asignación Lineal, en la hoja dedicada para el mismo debe seleccionarse el tipo jerarquización que se le aplicará a los datos transformados en todos sus criterios en crecientes, mediante una lista desplegable.

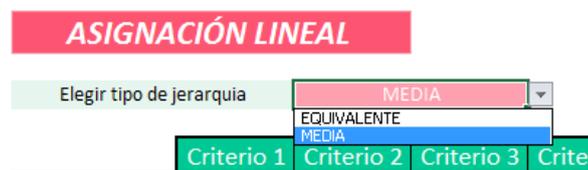


Ilustración 97: Asignación Lineal, Jerarquización

A partir de los datos aportados por el usuario, procedemos a la construcción de la matriz que se presenta en la hoja. En esta se muestran las jerarquizaciones de las alternativas en cada atributo. La ordenación de las alternativas para los criterios se ha implementado dando los valores más bajos a las alternativas mejor valoradas,

incrementándose hasta la última posicionada en el ranking del criterio, que obtendrá el valor más alto.

Por otro lado, en caso de empate, entra en juego la principal diferencia entre la aplicación de la jerarquización media y la equivalente. Si el usuario ha decidido implementar el método según jerarquía equivalente, obtendrá en caso de empate que las alternativas implicadas tendrán la puntuación correspondiente a la posición más alta posible no ocupada, es decir, el valor más bajo posible. Sin embargo, si el decisor elige jerarquía media, los empates se resolverán mediante la aplicación de la jerarquía promedio de los valores ocupados por las posiciones correspondientes a estas alternativas.

La ordenación final de las alternativas se muestra en la columna *Elección* (Ilustración 98), construida a partir de otra columna anexa en la cual realizamos la suma de las puntuaciones obtenidas en cada criterio para cada alternativa. De esta forma, podemos observar, que aquellas alternativas cuya suma aporta un dato más bajo, pues son las mejor valoradas en los criterios, ocuparán las primeras posiciones de la columna final de resultados.

| VALORACIÓN |
|------------|
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |

| ELECCIÓN | VALORACIÓN |
|----------|------------|
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |
|          |            |

Ilustración 98: Asignación Lineal, Solución

### 5.13 TOPSIS

En el caso que el método multiatributo elegido por el decisor sea Topsis, el usuario debe introducir en la fila reservado para ello, en color , los pesos correspondientes a cada criterio. Estos pesos deben ser valores numéricos positivos, que serán tratados, en la línea siguiente, con el fin de obtener pesos ponderados, pues estamos ante un método compensatorio.

| TOPSIS           |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PESOS            |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PESOS PONDERADOS |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 99: TOPSIS, Pesos

En la hoja reservada para esta metodología, y puesto que debemos emplear el concepto de vector unitario para la normalización de los valores introducidos por el usuario, tenemos una matriz que muestra dicha transformación. A partir de ella obtenemos dos vectores de apoyo, que más tarde emplearemos, en los cuales se muestra el valor más alto, en la fila  $V_i^+$ , y el más bajo,  $V_i^-$ , obtenidos para cada criterio. Dichos valores serán resaltados en el mismo color que el indicador en la matriz generada.

|         |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $V_i^+$ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $V_i^-$ |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 100: TOPSIS, Vectores apoyo

Con estos vectores y los datos normalizados mediante en la técnica de vector unitario, podemos calcular los vectores distancia para cada una de las alternativas. La razón de estos vectores nos proporciona el Índice de Similitud (li), según el cual realizaremos la ordenación final de las alternativas en la columna *Elección* (Ilustración 101).

Las alternativas que alcancen un Índice más próximo a la unidad, serán aquellas que mejor resuelvan el problema planteado según el método Topsis, con lo cual antes aparecerán en la columna comentada, y así realizaremos la ordenación de todas las alternativas.

| $d_i^+$ | $d_i^-$ | li | ORDEN DE ELECCIÓN | ELECCIÓN |
|---------|---------|----|-------------------|----------|
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |
|         |         |    |                   |          |

Ilustración 101: TOPSIS, Solución

5.14 AHP

Si la elección del decisor ha sido el método AHP, deberá seleccionar en primer lugar la aproximación, de entre las cuatro comentadas en el Capítulo 3, según la cual implementar el método. Estas cuatro posibilidades se muestran en una lista desplegable.

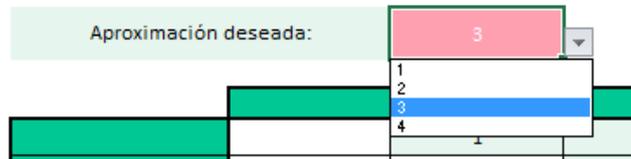


Ilustración 102:AHP, Aproximación

A continuación, deben ser introducidas todas las valoraciones cada para la comparación de cada par de criterios y dentro de cada criterio entre cada par de alternativas. Para ello disponemos de una matriz de comparación de criterios y tantas matrices como atributos tengamos para la comparación de alternativas en ellos.

Todas las matrices son semejantes a la mostrada a continuación (Ilustración 103).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 103:AHP, Introducción de datos

De forma que en color  aparecerá en este caso el criterio para el cual realizaremos la comparación de alternativas, en  figurarán las alternativas disponibles del problema y el color  se reservará para las celdas en las cuales el usuario debe introducir los datos de las comparaciones. En las celdas no coloreadas de la matriz realizaremos el inverso del valor introducido por el usuario.

En este caso los valores que toman las comparaciones comentadas se encuentran reglados según lo comentado en el Capítulo 3. Como recordatorio introducimos la siguiente leyenda (Ilustración 104) en la hoja de Microsoft Excel ®.

| Bij | i frente a j es                |
|-----|--------------------------------|
| 1   | Igualmente importante          |
| 3   | Ligeramente más importante     |
| 5   | Notablemente más importante    |
| 7   | Demostablemente más importante |
| 9   | Absolutamente más importante   |

| Bij | i frente a j es                  |
|-----|----------------------------------|
| 1   | Igualmente importante            |
| 1/3 | Ligeramente menos importante     |
| 1/5 | Notablemente menos importante    |
| 1/7 | Demostablemente menos importante |
| 1/9 | Absolutamente menos importante   |

Ilustración 104: AHP, Leyenda

En las celdas donde debemos introducir dichos datos hemos contemplado que el usuario desee ser más riguroso en las comparaciones, pudiendo establecer valores intermedios entre los estipulados en la leyenda. Si el usuario desea insertar fracciones, estas deben estar precedidas del signo =.

Una vez realizadas todas las comparaciones y seleccionada la aproximación a realizar, construimos una matriz resumen, en la cual se muestre el vector pesos calculado para cada criterio. También presentamos el vector pesos obtenido para la matriz de criterios. Con estas dos matrices intermedias construimos la Matriz de Comparación de alternativas, mediante la cual deberemos ordenar las alternativas, dando de esta forma solución al problema propuesto.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 105:AHP, Matriz resumen de criterios

| Matriz de criterios |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                     |  |  |  |  |  |  |  |
|                     |  |  |  |  |  |  |  |

| Matriz de comparación |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                       |  |  |  |  |  |  |  |
|                       |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 106: AHP, Matrices intermedias

Con la última de estas matrices realizamos la ordenación final de las alternativas, posicionándose como mejores resultados para el problema aquellas alternativas que alcancen un valor más alto en la Matriz de comparación.

| ORDEN DE ELECCIÓN | VALORACIÓN |
|-------------------|------------|
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |

Ilustración 107: AHP, Solución

### 5.15 Electre I

La información requerida en el caso de seleccionar el método Electre I, se debe introducir del siguiente modo.

- La elección del método de normalización se fijará según una lista desplegable, que tendrá disponible las cuatro opciones estudiadas.

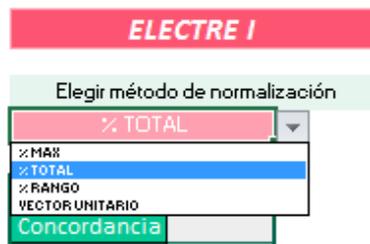


Ilustración 108: Electre I, Normalización

- La asignación de los pesos para cada criterio se introducirá en la línea, reservada para ello, marcada en  . En la línea inferior se puede observar la transformación de dichos pesos en pesos ponderados.

|                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| PESOS              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pesos normalizados |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 109: Electre I, Pesos

- Para esta metodología, como ya sabemos, deben proporcionarse los umbrales de Concordancia y Discordancia que nos servirán para seleccionar las relaciones entre alternativas en el paso final del método.

Cuanto más restrictivos sean estos Umbrales, es decir, más próximo sea a la unidad el Umbral de Concordancia y más cercano a cero el de Discordancia, más fiable será la solución dada para el problema.

Para introducir estos umbrales se han habilitado dos celdas (Ilustración 110), en las cuales los valores introducidos deben estar entre 0 y 1 ambos casos.

| Introducir umbrales |                      |
|---------------------|----------------------|
| Concordancia        | <input type="text"/> |
| Discordancia        | <input type="text"/> |

Ilustración 110: Eletre I, Umbrales

Una vez que toda la información ha sido introducida en el programa, podemos realizar el análisis del resultado.

En primer lugar, se muestra al usuario una réplica de la matriz de datos normalizados según el método elegido sobre el mismo. Esta matriz servirá de base para establecer los Índices de Concordancia y Discordancia de cada par de alternativas. Dichos índices se muestran en dos submatrices a continuación.

La matriz de Concordancia, nos aporta la suma de los pesos de aquellos criterios en los que la alternativa de la columna, supera a los de la fila. Recordamos que en todo momento la matriz debe leerse desde la columna a la fila.

Para realizar el Índice de Discordancia se ha separado, para facilitar los cálculos, numerador y denominador, que se muestran en dos submatrices, a su vez, en la hoja en la cual nos encontramos. Sin embargo, la forma de evaluar este índice se realiza de igual manera que para el Índice de Concordancia. Ahora mediremos cuanto más débil es la alternativa de la columna, frente a la de la fila.

Una vez construidos las matrices anteriores, pasamos a establecer las relaciones de sobrecalificación entre alternativas. En este momento entran en juego los umbrales pedidos al usuario, pues si nos centramos en la comparación de dos alternativas en concreto, se establecerá una relación de sobrecalificación cuando el Índice de Concordancia supere el umbral dado por el decisor y el Índice de Discordancia calculado sea inferior al proporcionado como dato. Si se cumplen ambas expectativas, la alternativa de la columna sobrecalificará a la de la fila. Las relaciones de sobrecalificación establecidas de muestran en una nueva matriz de comparación de alternativas.

Finalmente, como solución al problema planteado, proporcionaremos al usuario, mediante una columna habilitada para ello, aquellas alternativas que no han resultado sobrecalificadas, siendo estas las soluciones viables para el mismo.

| ACEPTABLES |
|------------|
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |
|            |

Ilustración 111: Elete I, Solución

### 5.16 Promethee I y II

Para este último método el decisor ha de tener en cuenta que han sido implementadas, por similitud en el proceso, las modalidades correspondientes a la primera generación, es decir, el método Promethee I y II. Sin embargo, en cada uno de ellos se presenta la resolución final de manera diferente, como comentaremos más adelante.

El primer paso dado por el usuario en este método será la introducción de los pesos de los criterios. Como en apartados anteriores, cuenta con una línea en color  , habilitada para ello, y a continuación se muestran las ponderaciones de los mismos.

|                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PESOS            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PESOS PONDERADOS |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 112: Promethee, Pesos

Para la resolución de este método debemos aplicar un filtro a cada atributo, según el cual trasladaremos los datos del problema a una escala normalizada, que nos permita la comparación de alternativas en cada criterio. Por ello, el usuario debe fijar antes de la evaluación del mismo, un filtro, de entre los seis propuestos por Brans, y comentados en el Capítulo 3, para cada atributo. Esto se realiza mediante una lista desplegable, en la que se elegirá la función a implementar.



Ilustración 113: Promethee, Filtros I

Si para el filtro seleccionado debemos introducir umbrales para la aplicación del mismo, debemos completar las siguientes casillas, en caso contrario se dejarán vacías.

|          |         |  |
|----------|---------|--|
|          |         |  |
| Filtro   | Natural |  |
| Umbrales |         |  |

Ilustración 114: Promethee, Filtros II

En color  introduciremos el umbral inferior del modelo de filtro seleccionado, y en  el umbral superior. Si solo es necesario un umbral, lo introducimos en la celda reservada para el umbral inferior.

Una vez fijados los filtros e introducida la información necesaria para cada uno de ellos tenemos, en la hoja de Microsoft Excel® en la que nos encontramos, las matrices de comparación de pares de alternativas para cada criterio, sobre las que aplicaremos el filtro seleccionado en cada caso.

A continuación, como matriz resumen, tenemos la comparación de pares de alternativas en todos sus criterios cuando los datos de estos han sido sometidos a los filtros establecidos. Sobre esta matriz (Ilustración 115) construimos los flujos (Ilustración 116) necesarios para realizar en ambos modelos propuestos la solución del problema.

|  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 115: Promethee, Matriz de comparación de alternativas

|  |          |          |        |
|--|----------|----------|--------|
|  | $\phi^+$ | $\phi^-$ | $\phi$ |
|  |          |          |        |
|  |          |          |        |
|  |          |          |        |
|  |          |          |        |
|  |          |          |        |

Ilustración 116: Promethee, Flujos generados

En este momento separamos las dos metodologías propuestas para el método Promethee.

### 5.16.1 Promethee I

Si el usuario desea como solución al problema multiatributo planteado una matriz con las relaciones establecidas entre pares de alternativas, estamos ante el modelo Promethee I. En él, proporcionaremos una matriz de comparación (Ilustración 117), en la cual aparecen las relaciones de Preferencia, Preferencia Inversa, Indiferencia o Incomparabilidad entre alternativas.

| PROMETHEE I |  |  |  |  |  |  |
|-------------|--|--|--|--|--|--|
|             |  |  |  |  |  |  |
|             |  |  |  |  |  |  |
|             |  |  |  |  |  |  |
|             |  |  |  |  |  |  |
|             |  |  |  |  |  |  |
|             |  |  |  |  |  |  |

Ilustración 117: Promethee I, Solución

### 5.16.2 Promethee II

En caso contrario, es decir, si el decisor opta por el método Promethee II, obtendrá como respuesta al problema la ordenación de las alternativas según el flujo neto obtenido en la última fase, según el cual una alternativa es mejor cuanto más próximo sea este a la unidad.

| PROMETHEE II      |            |
|-------------------|------------|
| ORDEN DE ELECCIÓN | VALORACIÓN |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |
|                   |            |

Ilustración 118: Promethee II, Solución

## 6 ESTUDIO ECONÓMICO

### 6.1 Introducción

En este proyecto se ha realizado la implementación en Microsoft Excel ® de las metodologías de ayuda a la Toma de Decisión más relevantes y más empleadas en la actualidad. Para su mejor comprensión se ha desarrollado una breve introducción de dichos métodos, así como sendos manuales para Programador y Usuario.

Se trata por tanto de un proyecto de implementación de modelos matemáticos en Microsoft Excel ® y al evaluar los costes de desarrollo, no hará falta considerar el coste de nuevos equipos ni de locales, sino el coste de los materiales y de las horas empleadas en el diseño y elaboración de cada una de las fases de estudio y diseño. Por lo tanto, a diferencia de otros proyectos industriales de tipo mecánico, electrónico o eléctrico, éste no representa un aporte sustancial de material.

En la gestión de este proyecto, se ha puesto especial interés en cuestiones relativas a la Ingeniería de Métodos Organizativos, con las características especiales de aquellos dedicados a problemas multiatributo. Algunos de los aspectos más importantes son la gestión y el presupuesto.

En este apartado se expondrán los puntos fundamentales de la gestión del proyecto, con una breve exposición del personal involucrado en el desarrollo del estudio.

#### 6.1.1 Jerarquía en un proyecto Toma de Decisión

Las personas que generalmente intervienen en la realización de un proyecto de este tipo pueden ser clasificadas según los siguientes roles:

- Director
- Responsable de Organización
- Encargado de Implementar los modelos
- Responsable de departamento
- Auxiliar administrativo

Para llevar a cabo la operativa del trabajo se establecen unas relaciones entre ellas de acuerdo a una determinada jerarquía existente, tal y como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El Director será el responsable de la idea del proyecto, de su planificación y se encargará de la realización de un presupuesto económico. Además, otras de sus

tareas radicarán en coordinar a las diferentes personas que intervienen en la realización del mismo. Por último, realizará la validación final del proyecto, antes de ser entregado al cliente.

El Responsable de Organización es el que define las especificaciones concretas sobre las que luego será evaluado el proyecto, estableciéndose estas como indicador del cumplimiento de los requerimientos establecidos. La relación con la Dirección, así como el conocimiento de las metodologías y la herramienta según la cual serán implementadas estas, resulta fundamental para que el producto final resulte del agrado del cliente y la Dirección. Junto con el Encargado de la implementación de los métodos, el Responsable de Organización llevará a cabo la puesta en marcha y desarrollo del proceso de implementación.

El Encargado de Implementar los métodos se encarga de reunir la información necesaria para la realización del trabajo; es decir, debe documentarse sobre la materia a desarrollar, si es posible contrarrestando opiniones con expertos en la misma, desarrolladores de Hojas de Cálculo y posibles usuarios, y elabora junto con el Responsable de Organización la manera de abordar la implementación de los métodos. Aquí entra en juego el papel del Auxiliar administrativo, que servirá de apoyo para la elaboración de la documentación.

Por último, el Responsable de Departamento informa sobre todas las circunstancias específicas de su Departamento que afectan a la implementación de las metodologías multiatributo.

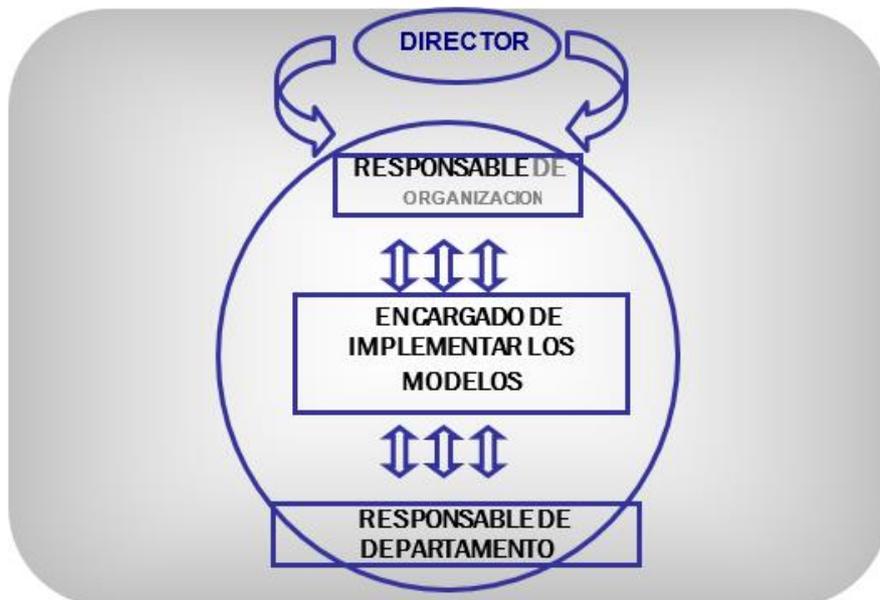


Ilustración 119: Organización del Proyecto

## 6.2 Fases de desarrollo

A continuación, se van a exponer las características de los documentos que forman la implementación de herramientas matemáticas en un software concreto, en este caso Microsoft Excel ®, los cuales hacen que la gestión de este tipo de proyectos deba presentar una orientación diferente al resto.

Una primera particularidad es que la implementación de los métodos deber ser diseñada sobre el software de Microsoft Excel ®, es decir, no se fabrica en un sentido clásico. Los costes de la planificación se encuentran en las horas de ingeniería empleadas, y no en la fabricación física del producto. Como muestra, considérese el bajo coste de los medios de almacenamiento magnético en los que se graban los documentos, comparándolo con el coste global del sistema.

La segunda diferencia se encuentra en la vida útil del producto. El documento de Microsoft Excel ® generado no se degrada. De forma que una vez que se han detectado y corregido los errores que puedan existir puede seguir funcionando, la vida útil de ésta es ilimitada. Sin embargo, el fichero debe ser actualizado mediante las revisiones y correcciones, lo cual implicará un coste a posteriori.

Otra particularidad es el mantenimiento. Para cualquier producto, una vez finalizado el proceso de elaboración, cuando una pieza de este producto falla, se sustituye por el repuesto adecuado volviendo a tener el sistema un funcionamiento correcto. Pero la implementación de las metodologías estudiadas debe de ser revisada constantemente, pues cualquier mejora o actualización de los métodos estudiados en este campo podrá influir en los resultados obtenidos. Los fallos suelen traer consecuencias más graves, pues un fallo a la hora de introducir datos o seleccionar un método de aplicación erróneo será más difícil de subsanar y detectar que la del mantenimiento de otros sistemas.

La determinación de las fases que conlleva el desarrollo de un proyecto de este tipo, puede variar según el punto de vista de la persona que lo esté analizando; sin embargo, estas etapas pueden ajustarse a la división mostrada en la Ilustración 120.

La explicación de cada etapa se expone a continuación:

· Necesidad y decisión de elaboración del proyecto. En esta etapa, se lleva a cabo un análisis general del sistema. Se decide cuáles serán las metodologías a implementar y bajo que software serán desarrolladas, en este caso, Microsoft Excel ®. Se busca el personal adecuado para realizar el desarrollo de los métodos. Sobre la base de los datos obtenidos se formula el problema, se establecen las líneas generales del mismo y se determina lo que hay que hacer (planificar tareas) y quién tiene que hacerlo (asignar recursos) para la creación del documento de Microsoft Excel ®. Es en este momento cuando debe analizarse la viabilidad del proyecto, ya

que la detección de su no-viabilidad en etapas posteriores aumenta considerablemente los costes.

- Presentación y difusión del proyecto. Se realiza una presentación a los Responsables de los Departamentos, solicitando su colaboración en el desarrollo de las metodologías. Se da a conocer el equipo que trabajará con los departamentos en el proceso de desarrollo de los métodos bajo el software Microsoft Excel ®.

- Recopilación de información. Una vez puesto en contacto los Responsables de los Departamentos con los encargados de la realización del diseño se procede a la recopilación de información de las diferentes secciones. Se procede también a la recopilación de datos tales como bibliografía, y la existencia de otros diseños implementados semejantes.

- Análisis, búsqueda y difusión. Con la información obtenida se procede a estudiar la posibilidad de formulación y el desarrollo del proceso a implementar de cada uno de los métodos analizados, así como, las posibles mejoras a introducir en estos procesos. Posteriormente, mediante el diagrama de relaciones, se reflejará sintéticamente la valoración de la importancia de los intercambios entre los diversos centros de actividad. A partir de aquí, se establece un diagrama de relación de espacios donde habrá que tener en cuenta, por una parte, cuáles son las necesidades de espacios y, por otra, cuáles son los espacios disponibles, los factores influyentes y las limitaciones prácticas. Finalmente se procede la evaluación y selección de las soluciones desarrolladas.

- Escritura, difusión e implantación de los métodos de ayuda a la Toma de Decisión multiaatributo. Una vez diseñado o planificado el proceso de desarrollo de las metodologías, se generan las copias y durante la entrega de la memoria, se comentará brevemente la formulación propuesta para cada uno de ellas, así como, el modo de funcionamiento de las revisiones, quejas de no-conformidad y solicitud de cambio.

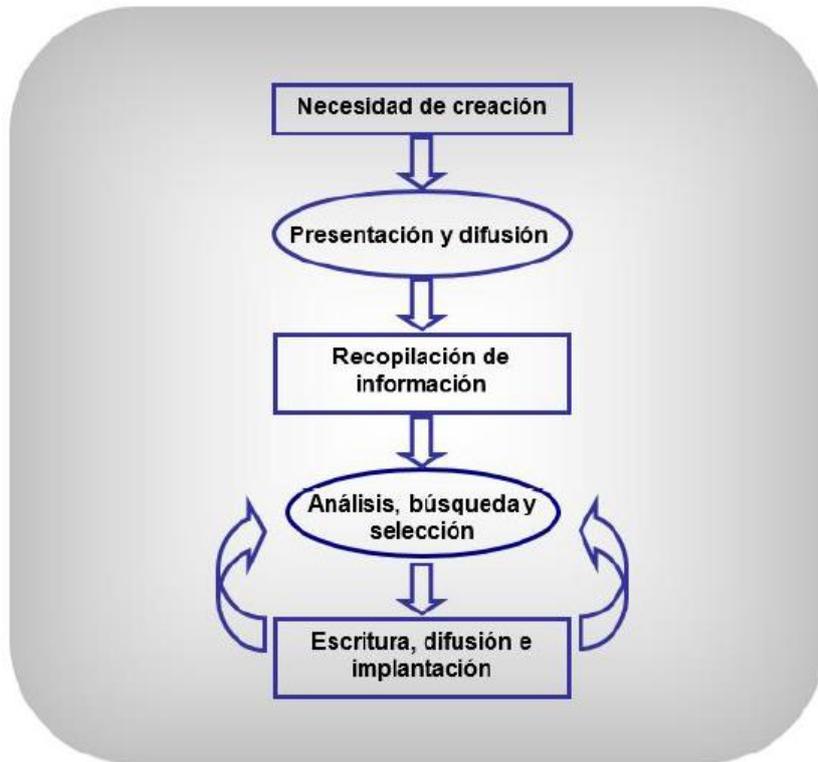


Ilustración 120: Desarrollo del Proyecto

### 6.3 Estudio económico

En este apartado se va a desarrollar el estudio económico propiamente dicho, relacionándolo con las diferentes etapas de la realización del proyecto. Se realizará el cálculo de todas las secciones, desglosando cada una de ellas más adelante.

Se llevará una contabilidad por actividades, en la que se valorará los costes de cada actividad realizada hasta la obtención del producto final. De esta forma, será posible analizar la influencia de cada uno de los procesos que intervienen con relación al coste total del producto. Para realizar el estudio, se procederá de la siguiente manera:

1. Cálculo de las horas efectivas anuales y de las tasas por hora de los salarios.
2. Cálculo de las amortizaciones del equipo.
3. Coste por hora y por persona de los materiales calificados como consumibles.
4. Coste por hora y por persona de los costes indirectos.
5. Horas de personal dedicadas a cada una de las etapas.

6.3.1 Horas efectivas anuales y tasas horarias de personal

Todos estos valores quedan reflejados en las Tabla 8 y Tabla 9.

| Concepto                                 | Días / horas |
|--|--------------|
| Año medio: (365,25)                      | 365,25       |
| Sábados y domingos: (365 * 2/7)          | -104,36      |
| Días efectivos de vacaciones:            | -20,00       |
| Días festivos reconocidos:               | -12,00       |
| Media de días perdidos por enfermedad    | -15,00       |
| Cursillos de formación, etc.:            | -4,00        |
| Total estimado días efectivos:           | 210          |
| Total horas/año efectivas (8 horas/día): | 1.680        |

Tabla 8: Días efectivos anuales

| Concepto               | Días / horas |
|------------------------|--------------|
| Año medio (semanas):   | 52           |
| Vacaciones y festivos: | - 5          |
| Enfermedad:            | -2           |
| Cursos de formación:   | - 1          |
| Total semanas:         | 44           |

Tabla 9: Semanas efectivas anuales

Para el desarrollo del proyecto se considera un Responsable de Organización, el cual actúa como director del proyecto y analista financiero. Además, encontraremos un encargado de llevar a cabo la gestión de los diferentes elementos de las formulaciones desarrolladas en el proceso de Toma de Decisión para cada uno de los métodos. Habrá un Jefe de Sección, colaborador durante la planificación en lo que concierne a su sección. Para el desarrollo de la documentación, se ha contratado a un Auxiliar Administrativo, que es el encargado de generar los informes correspondientes y ayuda en la confección de documentos. El coste horario y semanal de cada uno de estos profesionales queda reflejado en la Tabla 10.

| Concepto               | Director   | Resp. Organiz. | Encarg. Implem. | Resp. Dpto. | Secretario |
|------------------------|------------|----------------|-----------------|-------------|------------|
| Sueldo                 | 48.562 €   | 25.345 €       | 25.345 €        | 17.964 €    | 11.789 €   |
| Seguridad Social (35%) | 16.997 €   | 8.871 €        | 8.871 €         | 6.287 €     | 4.126 €    |
| Total:                 | 65.559 €   | 34.216 €       | 34.216 €        | 24.251 €    | 15.915 €   |
| Coste horario:         | 39,02 €    | 20,37 €        | 20,37 €         | 14,44 €     | 9,47 €     |
| Coste Semanal:         | 1.482,88 € | 773,93 €       | 773,93 €        | 548,54 €    | 359,99 €   |

Tabla 10: Coste de equipo de profesionales

### 6.3.2 Cálculo de las amortizaciones para el equipo informático utilizado

Para el equipo informático se considera un período de amortización de 5 años, con cuota lineal. El equipo se puede separar en dos grupos diferentes: un tipo de equipo destinado a realizar las tareas de recopilación de información y diseño de la distribución propiamente dicho, y que se denomina equipo de desarrollo y, por otra parte, el equipo de edición con el que se gestionan los documentos una vez definidos los mismos.

El coste de cada uno de estos equipos queda reflejado en las Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente.

| Concepto                            |                                    | Coste       | Cantidad      | Coste total         |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------|---------------|---------------------|
| Portátil HP Pavilion 15 Notebook PC |                                    | 1.100 €     | 1             | 1.100 €             |
| 64 Mb RAM                           |                                    |             |               |                     |
| Software de desarrollo              | Microsoft Windows 10               | 150 €       | 1             | 150 €               |
|                                     | Microsoft Word 365 ProPlus (2016)  | 99 €        | 1             | 99 €                |
|                                     | Microsoft Excel 365 ProPlus (2016) | 99 €        | 1             | 99 €                |
| <b>Total a amortizar:</b>           |                                    |             |               | <b>1.448 €</b>      |
|                                     |                                    | <b>Tipo</b> | <b>Número</b> | <b>Amortización</b> |
|                                     |                                    | Diaria      | 3,97 €        | 0,79 €              |
|                                     |                                    | Semanal     | 27,85 €       | 5,57 €              |
|                                     |                                    | Horaria     | 0,49 €        | 0,10 €              |

Tabla 11: Costes de equipo de desarrollo

| Concepto                                     |                                    | Coste   | Cantidad | Coste total    |
|--|------------------------------------|---------|----------|----------------|
| Portátil 2 en 1 ACER Spin 7 SP714-51 14"     |                                    | 1.250 € | 1        | 1.250 €        |
| Escáner HP 5590                              |                                    | 340 €   | 1        | 340 €          |
| Impresora Láser BROTHER HL-6180DW            |                                    | 250 €   | 1        | 250 €          |
| Impresora Multifunción HP PageWide Pro 477DW |                                    | 960 €   | 1        | 960 €          |
| Software de desarrollo:                      | Microsoft Windows 10               | 150 €   | 1        | 150 €          |
|  | Microsoft Word 365 ProPlus (2016)  | 99 €    | 1        | 99 €           |
|  | Microsoft Excel 365 ProPlus (2016) | 99 €    | 1        | 99 €           |
| <b>Total a amortizar:</b>                    |                                    |         |          | <b>3.148 €</b> |

|  | Tipo    | Número  | Amortización |
|--|---------|---------|--------------|
|  | Diaria  | 8,62 €  | 1,72 €       |
|  | Semanal | 60,54 € | 12,11 €      |
|  | Horaria | 1,07 €  | 0,21 €       |

Tabla 12: Costes de equipo de edición

### 6.3.3 Coste del material consumible

Para consumibles (papeles de impresora, CD´s, etc.), se ha calculado su consumo medio, por persona y hora de trabajo. Para cada uno de los equipos se obtienen los siguientes resultados (Tabla 13).

| Concepto                              | Coste         |
|---------------------------------------|---------------|
| Papeles de impresora                  | 54 €          |
| Suministros para impresora            | 240 €         |
| USB's y CD's                          | 50 €          |
| Otros                                 | 520 €         |
| <b>Coste anual total por persona:</b> | <b>864 €</b>  |
| <b>Coste horario por persona:</b>     | <b>0,30 €</b> |

Tabla 13: Coste Material consumible

### 6.3.4 Costes indirectos

Aquí se considerarán gastos que hacen referencia a consumos de electricidad, teléfono, calefacción, alquileres, etc. Las tasas de coste calculadas por persona y hora para cada uno de estos conceptos se muestran en la Tabla 14.

| Concepto                          | Coste          |
|-----------------------------------|----------------|
| Teléfono                          | 65 €           |
| Alquileres                        | 450 €          |
| Electricidad                      | 150 €          |
| Otros                             | 360 €          |
| <b>Coste anual por persona:</b>   | <b>1.025 €</b> |
| <b>Coste horario por persona:</b> | <b>0,35 €</b>  |

Tabla 14: Costes Indirectos

### 6.3.5 Horas de personal dedicadas a cada fase del proyecto

Mediante la realización de un estudio de tiempos y la revisión de otros estudios de tiempos para proyectos realizados en el departamento con características similares al presente, se determinó que la dedicación del personal en cada una de las etapas fue como se reseña en la Tabla 15.

| Personal                             | Etapas    |           |            |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|                                      | 1         | 2         | 3          | 4          | 5          |
| Director                             | 7         | 15        | 5          | 25         | 55         |
| Responsable de Organización          | 15        | 20        | 20         | 110        | 70         |
| Encargado de implementar los métodos | 10        | 10        | 300        | 140        | 35         |
| Responsable de Departamento          | 0         | 12        | 190        | 40         | 55         |
| Auxiliar administrativo              | 2,5       | 10        | 35         | 75         | 110        |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>30</b> | <b>67</b> | <b>550</b> | <b>350</b> | <b>325</b> |

Tabla 15: Horas dedicadas al personal del proyecto

## 6.4 Costes asignados a cada fase del proyecto

Para asignar los costes calculados para los recursos a cada fase del proyecto, se tendrán en cuenta las horas que cada persona dedica a cada etapa y las tasas horarias de salarios y amortización, así como los costes estimados para el material consumible y los costes indirectos.

### 6.4.1 Fase 1: decisión de elaboración del proyecto

En esta etapa intervienen el Director, el Responsable de Organización y el auxiliar administrativo. El director concreta cuáles son los objetivos que se desean alcanzar.

El director, en colaboración con el Responsable de Organización, define las líneas de actuación, los departamentos colaboradores durante el desarrollo del proyecto y orienta la actuación de los otros dos integrantes del equipo que intervienen en esta etapa.

El auxiliar administrativo se encarga de las tareas de redacción de documentos y mecanografía requeridas en esta etapa.

Los departamentos colaboradores serán Métodos, Microsoft Excel, Mejora Continua.

El tiempo empleado se detalló en la Tabla 15, resultando un total de 30 horas. En base a esto, los costes en esta fase se reparten según se indica en la Tabla 16.

| Concepto            |                                      | Horas | C.H.    | Coste total     |
|---------------------|--------------------------------------|-------|---------|-----------------|
| Personal            | Director                             | 7     | 39,02 € | 273,16 €        |
|                     | Responsable de Organización          | 15    | 20,37 € | 305,50 €        |
|                     | Encargado de implementar los métodos | 10    | 20,37 € | 203,67 €        |
|                     | Responsable de Departamento          | 0     | 14,44 € | 0,00 €          |
|                     | Auxiliar administrativo              | 2,5   | 9,47 €  | 23,68 €         |
| Amortización        | Equipo de desarrollo                 | 0     | 0,10 €  | 0,00 €          |
|                     | Equipo de edición                    | 4     | 0,21 €  | 0,86 €          |
| Material consumible | Varios                               | 35    | 0,30 €  | 10,43 €         |
| Costes indirectos   |                                      | 35    | 0,35 €  | 12,37 €         |
| <b>COSTE TOTAL:</b> |                                      |       |         | <b>829,66 €</b> |

*Tabla 16: Costes asociados a la Fase 1*

#### 6.4.2 Fase 2: presentación y difusión del proyecto

En esta etapa se realiza una presentación a los Responsables de los Departamentos, solicitando su colaboración. Se da a conocer el equipo que trabajará con los departamentos de desarrollo de los métodos. Los costes en esta etapa se resumen en la Tabla 17.

| Concepto            |                                      | Horas | C.H.    | Coste total       |
|---------------------|--------------------------------------|-------|---------|-------------------|
| Personal            | Director                             | 15    | 39,02 € | 585,35 €          |
|                     | Responsable de Organización          | 20    | 20,37 € | 407,33 €          |
|                     | Encargado de implementar los métodos | 10    | 20,37 € | 203,67 €          |
|                     | Responsable de Departamento          | 12    | 14,44 € | 173,22 €          |
|                     | Auxiliar administrativo              | 10    | 9,47 €  | 94,73 €           |
| Amortización        | Equipo de desarrollo                 | 12    | 0,10 €  | 1,19 €            |
|                     | Equipo de edición                    | 12    | 0,21 €  | 2,58 €            |
| Material consumible | Varios                               | 62    | 0,30 €  | 18,47 €           |
| Costes indirectos   |                                      | 62    | 0,35 €  | 21,91 €           |
| <b>COSTE TOTAL:</b> |                                      |       |         | <b>1.508,45 €</b> |

*Tabla 17: Coste asociado a la Fase 2*

### 6.4.3 Fase 3: recopilación de información

En esta etapa el Ingeniero en Organización encargado de implementar los métodos recopila toda la información. El coste de sus honorarios y el del Responsable del Departamento representan la mayor parte del total del coste.

En base al estudio de tiempos de la Tabla 15 y a las tasas horarias de personal, amortización, material consumible y resto de costes indirectos, los costes de esta fase se establecen y quedan como se muestra en la Tabla 18.

| Concepto                   |                                      | Horas | C.H.    | Coste total        |
|----------------------------|--------------------------------------|-------|---------|--------------------|
| <b>Personal</b>            | Director                             | 5     | 39,02 € | <b>195,12 €</b>    |
|                            | Responsable de Organización          | 20    | 20,37 € | <b>407,33 €</b>    |
|                            | Encargado de implementar los métodos | 300   | 20,37 € | <b>6.109,96 €</b>  |
|                            | Responsable de Departamento          | 190   | 14,44 € | <b>2.742,72 €</b>  |
|                            | Auxiliar administrativo              | 35    | 9,47 €  | <b>331,57 €</b>    |
| <b>Amortización</b>        | Equipo de desarrollo                 | 300   | 0,10 €  | <b>29,64 €</b>     |
|                            | Equipo de edición                    | 35    | 0,21 €  | <b>7,52 €</b>      |
| <b>Material consumible</b> | Varios                               | 500   | 0,30 €  | <b>148,97 €</b>    |
| <b>Costes indirectos</b>   |                                      | 500   | 0,35 €  | <b>176,72 €</b>    |
| <b>COSTE TOTAL:</b>        |                                      |       |         | <b>10.149,53 €</b> |

*Tabla 18: Costes asociados a la Fase 3*

### 6.4.4 Fase 4: análisis, búsqueda y selección

Es la etapa más crítica, en la que se toman las decisiones realización y evaluación de los distintos elementos, y por tanto, es imprescindible la colaboración de todo el personal involucrado en el desarrollo de este proyecto.

Los costes asignados a esta fase se muestran en la Tabla 19.

| Concepto        |                                      | Horas | C.H.    | Coste total       |
|-----------------|--------------------------------------|-------|---------|-------------------|
| <b>Personal</b> | Director                             | 25    | 39,02 € | <b>975,58 €</b>   |
|                 | Responsable de Organización          | 110   | 20,37 € | <b>2.240,32 €</b> |
|                 | Encargado de implementar los métodos | 140   | 20,37 € | <b>2.851,31 €</b> |
|                 | Responsable de Departamento          | 40    | 14,44 € | <b>577,41 €</b>   |

|                            |                         |     |        |                   |
|----------------------------|-------------------------|-----|--------|-------------------|
|                            | Auxiliar administrativo | 75  | 9,47 € | <b>710,50 €</b>   |
| <b>Amortización</b>        | Equipo de desarrollo    | 110 | 0,10 € | <b>10,87 €</b>    |
|                            | Equipo de edición       | 90  | 0,21 € | <b>19,33 €</b>    |
| <b>Material consumible</b> | Varios                  | 320 | 0,30 € | <b>95,34 €</b>    |
| <b>Costes indirectos</b>   |                         | 320 | 0,35 € | <b>113,10 €</b>   |
| <b>COSTE TOTAL:</b>        |                         |     |        | <b>7.593,76 €</b> |

*Tabla 19: Costes asociados a la Fase 4*

#### 6.4.5 Fase 5: escritura, difusión e implantación

En esta etapa se procede a la escritura de la memoria en la que se recoge el desarrollo realizado en Microsoft Excel ® de los métodos, labor encomendada al encargado de diseñar el del proyecto con ayuda del Auxiliar Administrativo. Una vez escritos se procederá a la revisión y aprobación final de los documentos. Esta tarea la realizarán el Responsable de Organización y el Director respectivamente.

Los costes asignados en esta fase se muestran en la Tabla 20.

| <b>Concepto</b>            |                                  | <b>Horas</b> | <b>C.H.</b> | <b>Coste total</b> |
|----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| <b>Personal</b>            | Director                         | 55           | 39,02 €     | <b>2.146,27 €</b>  |
|                            | Responsable de Organización      | 70           | 20,37 €     | <b>1.425,66 €</b>  |
|                            | Encargado de implementar métodos | los 35       | 20,37 €     | <b>712,83 €</b>    |
|                            | Responsable de Departamento      | 55           | 14,44 €     | <b>793,94 €</b>    |
|                            | Auxiliar administrativo          | 110          | 9,47 €      | <b>1.042,06 €</b>  |
| <b>Amortización</b>        | Equipo de desarrollo             | 30           | 0,10 €      | <b>2,96 €</b>      |
|                            | Equipo de edición                | 105          | 0,21 €      | <b>22,55 €</b>     |
| <b>Material consumible</b> | Varios                           | 180          | 0,30 €      | <b>53,63 €</b>     |
| <b>Costes indirectos</b>   |                                  | 180          | 0,35 €      | <b>63,62 €</b>     |
| <b>COSTE TOTAL:</b>        |                                  |              |             | <b>6.263,53 €</b>  |

*Tabla 20: Costes asociados a la Fase 5*

### 6.5 Cálculo del coste total

## | ESTUDIO ECONÓMICO

El coste total se obtiene como suma de los costes totales de cada una de las cinco fases del proyecto, que se detallaron en el anterior apartado. Los costes totales desglosados para cada una de las fases se muestran en la Tabla 21.

| Actividad   | Horas       | Pesetas            |
|---|-------------|--------------------|
| Decisión de elaboración del proyecto                  | 30          | 829,66 €           |
| Presentación y difusión                               | 67          | 1.508,45 €         |
| Recopilación de información                           | 550         | 10.149,53 €        |
| Análisis, búsqueda y selección                        | 350         | 7.593,76 €         |
| Escritura, difusión e implantación de la distribución | 325         | 6.263,53 €         |
| <b>TOTAL</b>  | <b>1263</b> | <b>26.344,93 €</b> |

*Tabla 21: Costes totales de cada fase*

A estos costes hay que aplicar el Margen Comercial y los Impuestos Indirectos (IVA, recargo de equivalencia, etc).

### 6.6 Diagrama de Gantt

Con el fin de facilitar la comprensión del desarrollo de las fases del proyecto y la participación de cada uno de los implicados en el mismo, acompañamos el estudio económico de un Diagrama de Gantt.

Han sido contempladas jornadas diarias de 8 horas, en las cuales el equipo de desarrollo del proyecto se dedicará íntegramente al mismo.

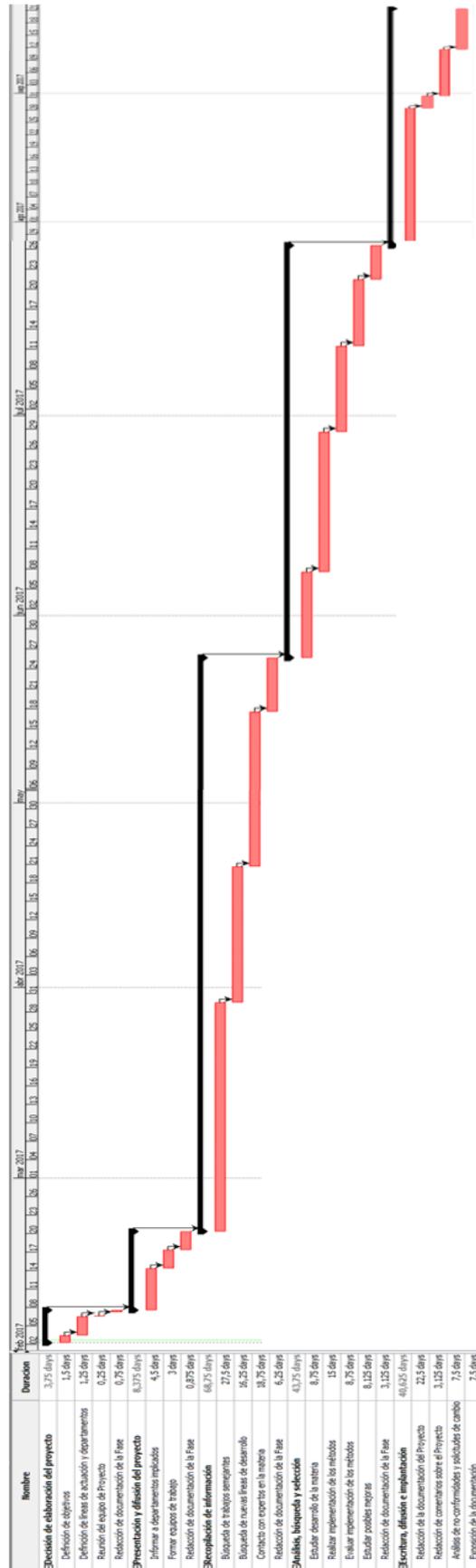


Ilustración 121: Diagrama de Gantt

## 7 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

### 7.1 Conclusiones

Como hemos podido comprobar a lo largo de la revisión histórica realizada en el segundo capítulo del Presente Trabajo Fin de Grado, el universo de la toma de decisiones es amplio y se encuentra en pleno desarrollo en la actualidad, por lo cual no se ha pretendido estudiarlo en su totalidad, pues no era objeto del proyecto. Si bien hemos comprobado que la función de la toma de decisión está compuesta por diversas variables que configuran tanto el comportamiento de individuos como de amplias estructuras organizativas. Por otro lado, la funcionalidad de esta metodología se basará tanto en el sistema implementado como en la interpretación final que realice el individuo o decisor para poner en práctica la resolución propuesta por el sistema, pues como hemos dicho en gran cantidad de ocasiones a lo largo del trabajo, los métodos de toma de decisión suponen una ayuda para que el decisor seleccione o pueda aclarar dudas frente a las alternativas propuestas para un problema concreto, pero la elección final de una de estas alternativas y su puesta en funcionamiento está en manos de este.

Por lo cual, con el fin de facilitar tanto la toma de decisión al usuario, que presente un problema multiatributo, como para ayudar a la resolución e implementación del mismo por el programador, mediante las diversas metodologías comentadas a lo largo del trabajo, se ha llevado a cabo la implementación en Microsoft Excel ® de los métodos desarrollados por medio de una matriz de decisión.

Matriz de decisión programada admite problemas que involucren hasta 10 alternativas y 15 criterios, pudiendo ser el número de los mismos variable, resultando ser la base para la implementación de los métodos desarrollados en el tercer capítulo del presente trabajo.

En el documento de Microsoft Excel ® que se ha desarrollado el proceso de programación de dichas metodologías se ha reservado una hoja para cada uno de los métodos a implementar, así como para la introducción de datos, su normalización y para la elección de la metodología según el cual implementar el problema.

Para facilitar el uso tanto al usuario que presente plantee el problema multiatributo, como a posibles programadores o desarrolladores de métodos de estas características, se han dedicado dentro de Trabajo Fin de Grado sendos manuales.

En el caso del Manual elaborado para el programador, pueden llegar a conocerse de una manera cómoda e interactiva todas las formulaciones empleadas en cada uno de los métodos implementados, acompañando cada una de las metodologías con un ejemplo con el fin de aportar mayor visibilidad de la programación realizada.

## | CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En el Manual de Usuario se ha pretendido, de forma clara e intuitiva, acompañar al mismo desde el momento que entra en el fichero que contiene la matriz implementada hasta la solución propuesta elaborada para el método seleccionado, pasando por la introducción de datos y la elección de dicha metodología.

Mediante el estudio económico realizado hemos verificado el coste de realización tanto de la matriz como del proyecto en su conjunto, basándonos en los costes incurridos para una entidad que opere en el sector de desarrollo de proyectos.

Con lo cual se puede concluir que el trabajo desarrollado verifica los objetivos establecidos en el primer capítulo del mismo. Y evaluando los objetivos personales sobre la realización del proyecto, puedo destacar que he logrado desarrollar en mayor medida mis conocimientos tanto sobre el software de Microsoft Excel®, como sobre las metodologías basadas en la ayuda a la toma de decisión de problemas multiatributo, lo cual era mi principal objetivo a la hora de seleccionar este tema como colofón a la esta etapa universitaria.

### 7.2 Futuros desarrollos

En relación con posibles mejoras o continuación que puede suscitar este Trabajo Fin de Grado, pueden destacarse los puntos comentados a continuación.

Por un lado, la matriz implementada puede ampliarse, es decir, reprogramar los métodos desarrollados en la misma, según lo comentado en el Manual de Programador, para proporcionar la posibilidad al decisor de introducir mayor número de alternativas o de atributos, según el problema planteado.

Por otro lado, resulta interesante definir ciertos atributos para que estos solo puedan tomar unos valores concretos, por ejemplo: Gasolina/Diésel, Analógico/Digital.

O también establecer rangos de valoración de las alternativas dentro de los atributos, es decir, poder fijar un valor mínimo y máximo entre los cuales debe encontrarse la alternativa para este criterio. Por ejemplo, mínima y máxima potencia o velocidad.

Si nos centramos en los métodos programados, podemos ver los siguientes puntos a desarrollar:

- Para la implementación realizada sobre el método de Asignación Lineal resulta interesante poder realizar la ordenación de manera inversa, es decir, que la alternativa más valorada sea la que mayor peso adquiera, o que el decisor elija la escala, con diferentes pesos jerarquizados, en la cual operar para la ordenación.

## | CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

- En el método AHP, podrá desarrollarse el Análisis de Consistencia en el programa ya realizado en Microsoft Excel ®, para completar y dar mayor seguridad al decisor frente a la solución final, pues a lo largo de tercer capítulo se han indicado los pasos teóricos de este estudio.
- A la hora de hablar del método Electre, nos hemos centrado en desarrollar la primera variante del mismo, es decir, el método Electre I. Con lo cual, teniendo como base este proyecto, pueden desarrollarse en Microsoft Excel ® los restantes modelos del mismo. Como recomendación para facilitar la continuación de este método se incide a comenzar por el método Electre II.
- Como para el método anterior, para el Promethee solo han sido implementadas sus dos primeras variantes, es decir, en el documento de Microsoft Excel ® desarrollado se pueden encontrar tanto el Promethee I como el II, pero no los modelos siguientes, pues estos no han sido motivo de estudio de este trabajo. Por ello la implementación de las siguientes versiones será una de las posibles líneas de continuación del presente Trabajo Fin de Grado.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Barba Romero, S., (1987), *Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta*.(2nd ed) [Online]. Available: <https://www.fundacionsepi.es>.
- Brans, Jean-Pierre y Bertrand Mareschal, (2002), *PROMÉTHÉE-GAIA : une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles ; Paris : Ellipses,
- Casañ Pérez, Almudena, (2013), “La decisión multicriterio; Aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación”, Proyecto Fin de Master en Edificación Especialidad Gestión, UPV, Valencia.
- Dawes, Robyn M.,(1994), *Rational Choice in an Uncertain World: The Psychology of Judgement and Decision Making*.
- Fernández Barberis, Gabriela y Escribano Ródenas, M<sup>a</sup> del Carmen, (2011),“La Ayuda a la Decisión Multicriterio: orígenes, evolución y situación actual” in Congreso Internacional de Historia de la Estadística y de la Probabilidad Asociación de Historia de la Estadística y de la Probabilidad de España (AHEPE).
- Gento Muncio, Ángel Manuel (2015 ,Oct 19), WINELECTRE: Ayuda a la decisión mediante los métodos ELECTRE. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net>.
- Gento Muncio, Ángel Manuel y Redondo, Alfonso, (2005), “Comparación del método ELECTRE III y PROMETHEE II: Aplicación al caso de un automóvil” in IX Congreso de Ingeniería de Organización, Gijón.
- Gross, Manuel, (11 de Enero de 2010), [www.manuelgross.blingo.com](http://www.manuelgross.blingo.com).
- International Society on MCDM, <http://www.mcdmsociety.org>.
- Ishizaka, Alessio, (2013), *Multi-criteria decision analysis: Methods and Software*. Chichester (Reino Unido) : Wiley.
- Keeney, Ralph L (1982), *Operations Research*, San Francisco, California.
- Masud, Abu S.M. y Ravindran, A. Ravi, (2008), *Multiple Criteria Decision Making*.
- Maystre, Lucien Yves, (1994), *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Paris : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Pomerol J.C., Barba Romero S., *Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica*. Universidad de Alcalá, España.
- Romero, C., (1993), *Teoría de la Decisión multicriterio. Concepto, Técnicas y aplicaciones*. Alianza Universidad Textos. Madrid.

## | CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

- Roy, B. y Bouyssou, D. (1993). *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas*. Economica, París.
- Saaty, Thomas L, (1980), *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, Thomas L., (1999), *Decision making for leaders : the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. Pittsburgh : RWS.