

TEMA 7. Técnicas o Métodos de Evaluación

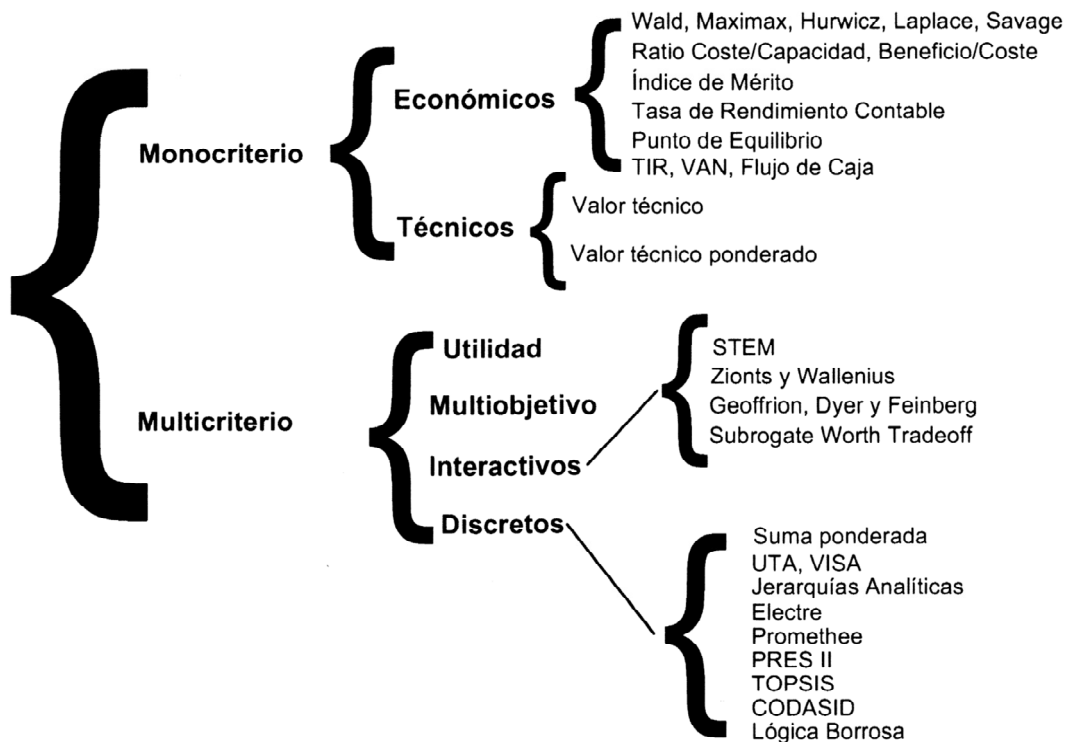
7.1. Análisis económico y evaluación monocriterio.

7.2. Toma de decisiones multicriterio.

Hasta ahora el diseñador ha llegado a desarrollar utilizando varias técnicas, varias soluciones para el diseño planteado. Las técnicas planteadas en este tema son utilizadas en procesos de toma de decisiones relacionadas con diferentes disciplinas profesionales. Es por esto, que deben considerarse como horizontales, puesto que su alcance es general. Por estas razones se puede concluir que las diferentes técnicas de evaluación ocupan un lugar importante en la actividad de diseño.

Una de las características importantes en el proceso de diseño, es la fase de retroalimentación. Esta persigue principalmente dos objetivos, el primero tiene que ver con el modelo propuesto generalmente para alcanzar el diseño más adecuado, que se basa en las aproximaciones sucesivas y progresivas en la resolución del problema y el segundo, reside en la necesidad de comprobar la bondad del diseño respecto de los requerimientos impuestos al mismo.

Estos objetivos, son los que justifican la utilización de las diversas técnicas de evaluación en el proceso de diseño de productos industriales. Como se muestra en la figura xx, existe un amplio abanico de técnicas de evaluación, habiendo seleccionado aquellas que son más adecuadas al problema del diseño.



Se puede observar en la imagen que se dividen en dos grandes grupos, técnicas monocriterio y multicriterio. Hay que destacar que, el ejercicio de toma de decisiones en el proceso proyectual, tiene un marcado carácter multicriterio, ya que una decisión adecuada ha de sustentarse en la valoración de las potenciales alternativas de acuerdo con los heterogéneos factores que intervienen en el problema. En el caso del diseño de productos tiene un marcado interés debido a que el espacio o conjunto de requerimientos asociados a cualquiera de los objetos de diseño siempre posee varios elementos.

Aun teniendo en cuenta que en el ámbito del diseño industrial es un problema intrínsecamente multicriterio, también es cierto que las técnicas de evaluación monocriterio tienen especial interés y aplicación en aquellos casos en que existe algún criterio limitante. Concretamente, el criterio económico es limitante desde el punto de vista del promotor privado.

Análisis económico y evaluación monocriterio

Objetivo

Conocer los conceptos básicos referentes a la evaluación económica del diseño de un producto, mediante el uso de ratios.

Evaluar numéricamente las distintas alternativas existentes, con el objetivo de seleccionar la mejor de entre todas ellas, en base al criterio económico (máximo beneficio, mínimo coste) y en ambientes de incertidumbre.

Definición

La evaluación económica del proyecto es una etapa del diseño que se repite como conclusión de cada fase del diseño que se cubre y que tiene un carácter de convergencia progresiva en sus resultados hasta los reales. Los resultados obtenidos tras la realización de una evaluación económica, beneficios o costes, ayudan al proyectista a seleccionar la mejor de todas las alternativas de diseño existentes, mediante la aplicación de una serie de técnicas de decisión, que tienen en cuenta la incertidumbre debido al desconocimiento de los posibles comportamientos futuros del mercado.

Desarrollo de la técnica

Introducción

Uno de los aspectos más importantes de la evaluación económica es el conocimiento previo de los costes, especialmente difícil en el caso de la estimación de costes de fabricación. Esto es debido a la gran cantidad de factores que influyen en su determinación: la asignación de las amortizaciones de la maquinaria para cada unidad de producto (cuando es muy habitual que una misma máquina fabrique piezas para productos diferentes), los costes de mano de obra directa e indirecta (cuando lo habitual es que la gama de productos fabricados en una empresa sea variada en número de referencias, tipo y cantidad de cada uno, que además varían según la programación de la producción entre períodos de tiempo), incluso los precios de las materias primas o productos semielaborados (sujetos a fluctuaciones sus precios y a veces difíciles de determinar con precisión por el solo hecho de contabilizar o no el uso posterior para otras piezas o para el reciclaje de los restos de materias primas desechados).

Por supuesto el tipo de producto con el que se esté trabajando influye tremendamente en la estimación de los costes de fabricación y, por lo tanto, de su precio final. Para los productos singulares o que se fabriquen en una o muy pocas unidades, *productos no seriales*, la estimación de los costes es más sencilla y puede realizarse contabilizando cada pieza y cada operación de fabricación para hallar el coste de fabricación del producto. La estimación de costes se complica para los productos que se fabrican en muchas unidades y de manera continua durante un periodo de tiempo,

productos seriables, en los que el análisis parcial de la fabricación de cada pieza y del ensamblaje de los mismos es el camino último para acercarse, una vez conocida la forma y características de cada pieza, al valor real del coste del producto.

Del mismo modo, el grado de innovación en el producto es otro factor que normalmente determina la dificultad en la estimación de los costes: productos *totalmente novedosos* llevan asociada una mayor complejidad en dicha estimación que productos ya conocidos o semejantes a anteriores, en los que la experiencia previa en la fabricación es la fuente más fiable para la estimación de los costes. En el caso extremo, la estimación de los costes es prácticamente inmediata en el caso de *rediseños* sobre un producto ya existente.

Los costes de fabricación dependen tremendamente de la empresa que los fabrique: de su estructura y características internas, de la tecnología o maquinaria que utiliza, de su cuota de mercado (que determina el volumen de producción y, por lo tanto, los costes unitarios de cada producto), etc. Por ello, cada empresa suele tener sus propios métodos de estimación de costes, en los que la experiencia anterior es la mejor fuente de información para acercarse lo más posible al valor real final de dichos costes.

Estructura de costes

De modo general el coste de una unidad de producto incluye una serie de conceptos a los que es imputable dicho coste. En general, el precio que el comprador último del producto paga al adquirir el mismo cubre los costes de fabricación del fabricante, su margen de beneficios, el margen del intermediario o vendedor y los impuestos correspondientes (IVA), como se muestra en la siguiente figura.

Los costes de fabricación incluyen las cantidades imputables a los siguientes conceptos:

- *Materiales o materias primas* (hay que tener en cuenta los desperdicios no directamente aprovechables en el producto).
- *Los productos semielaborados o materias primas intermedias* que incorpora (su coste suele ser más fácil de determinar al estar sujetos al precio de venta de un proveedor al cual se le ha subcontratado su fabricación).
- *La mano de obra directa*, aquella que interviene directamente en la fabricación y que no forma parte de la estructura de la empresa de servicios auxiliares de la misma (I+D, marketing o ventas, dirección, etc.) que es proporcional al volumen de producción, pues aumentará con el número de unidades fabricadas.
- *Las amortizaciones de la maquinaria, instalaciones y obra civil*, cuyo coste total es bien conocido pero no así la cantidad que corresponde asignar a cada unidad producida. Lógicamente es un coste unitario que variará con el volumen de producción: si la empresa fabricase una única unidad, al coste de esta unidad que habría que imputar todas las amortizaciones. En cambio, si la empresa fabricase dos unidades del mismo producto, el coste unitario de las amortizaciones resultaría de dividir las amortizaciones totales por dos. Pero cuando se fabrican miles de unidades de productos diferentes, cuando el número de máquinas es elevado y, como es habitual, cada máquina ha sido comprada en momentos diferentes y no está o estará exclusivamente dedicada a la fabricación de piezas del producto en cuestión, la asignación de las amortizaciones por unidad de producto no es sencilla ni evidente.

Si exceptuamos los de amortización, los costes mencionados son los llamados *costes variables*, que dependen del número de unidades fabricadas y crecen proporcionalmente con dicho número. Las amortizaciones son un coste fijo al que hay que hacer frente se fabrique una o mil unidades. No obstante, hay que hacer notar que el coste de cada unidad de producto imputable a este concepto sí que varía, lógicamente, con el volumen de producción, lo que no debe confundirse con su carácter de coste fijo.

El resto de costes de fabricación del producto son imputables a los costes fijos, esto es:

- *Mano de obra indirecta*: parte del coste del producto destinado a cubrir la mano de obra que no depende del volumen de producción (personal de dirección, gerencia, administración, diferentes departamentos, etc.).
- *Gastos generales*: son los correspondientes a alquileres, seguros, administración, viajes, publicidad, etc.

Con todo esto concluye la estructuración de los costes unitarios del producto. Sobre ellos, al comprador final le llegan, dentro del precio de venta al público, los márgenes de beneficios del fabricante (que constituye junto a los costes de fabricación el que podríamos denominar precio de venta directa) y los que carga el intermediario vendedor para conformar, junto a los impuestos, el *Precio de Venta al Público* (PVP).

Estimación de costes y beneficios por ratios. Estimación del volumen de producción

En las primeras fases del diseño o proyecto es muy habitual la estimación de costes mediante el uso de ratios. Un ratio es la relación entre dos parámetros, si esta relación es constante, o suficientemente próxima a una constante, y se conoce su valor, puede obtenerse el valor estimado de uno de los parámetros para otro caso similar si se conoce el otro parámetro.

Esta manera de estimar el orden de magnitud de determinados parámetros, no sólo económicos, es práctica habitual en las empresas de ingeniería de proyectos, en los que es fundamental conocer el orden de magnitud de las variables principales del proyecto mucho antes de su concreción en el Diseño de detalle.

La metodología de estimación de costes y de volumen de producción que se presenta a continuación se basa en el uso de diferentes ratios para diferentes sectores. Los ratios que se proponen utilizar se inspiran en los propuestos por W. R. Park en “Cost Engineering Analysis”, adaptados al entorno español. Hay que reseñar que estos ratios son generales y orientativos, obtenidos además para un mercado determinado (el norteamericano) en un momento concreto. Por ello sus valores no han de tomarse como generalizables, teniendo en cuenta que cada empresa de producción o cada empresa de ingeniería suelen disponer de sus propios ratios actualizados en los que se incorpora la experiencia de la empresa. Mediante el uso de ratios como los mostrados, muy aproximados, el error suele llegar al 40%, elevado sin duda, pero perfectamente admisible para desestimar determinadas alternativas. De todos modos con el uso de ratios más precisos este margen de error puede reducirse hasta un 20-25%.

Grupo industrial	Vida media V_m (años)	Capital total/ventas anuales $a = CT/VA$
Productos alimenticios	13	0.50
Tabaco	16	0.71

Grupo industrial	Vida media V_m (años)	Capital total/ventas anuales $a = CT/VA$
Industria textil	16	1.06
Confección	10	1.64
Madera y derivados	12	1.01
Mueble	12	0.65
Papel	15	1.01
Imprenta y publicaciones	13	0.86
Industria química	14	0.91
Derivados del petróleo	17	1.20
Caucho y plásticos	13	0.86
Cuero	12	0.58
Piedra, cerámica y vidrio	16	1.02
Metales primarios	17	1.17
Transformados metálicos	14	0.74
Maquinaria no eléctrica	15	0.92
Equipos eléctricos	12	0.71
Equipamiento de transporte	14	0.65
Instrumentos	14	0.87
Fabricaciones diversas	13	0.72
<i>Valor promedio general</i>	14	0.87

Características financieras por grupos industriales

Grupo industrial	Porcentaje de ventas anuales (tanto por uno)			
	Mano de obra indirecta $b:= MOI/VA$	Mano de obra directa $c:=MOD/VA$	Materiales directos $d:=M/VA$	Resto
Productos alimenticios	0,05	0,08	0,65	0,22
Tabaco	0,02	0,07	0,55	0,36
Industria textil	0,05	0,20	0,56	0,19
Confección	0,07	0,23	0,48	0,22
Madera y derivados	0,05	0,21	0,52	0,22
Mueble	0,09	0,24	0,45	0,22
Papel	0,07	0,17	0,51	0,25
Imprenta y publicaciones	0,16	0,20	0,33	0,31
Industria química	0,07	0,09	0,43	0,41
Derivados del petróleo	0,02	0,04	0,75	0,19
Caucho y plásticos	0,08	0,20	0,45	0,27
Cuero	0,07	0,25	0,46	0,22
Piedra, cerámica y vidrio	0,08	0,21	0,41	0,30
Metales primarios	0,06	0,17	0,56	0,21
Transformados metálicos	0,09	0,21	0,46	0,24
Maquinaria no eléctrica	0,12	0,21	0,42	0,25
Equipos eléctricos	0,14	0,19	0,42	0,25
Equipamiento de transporte	0,08	0,15	0,57	0,20
Instrumentos	0,14	0,17	0,34	0,35
Fabricaciones diversas	0,10	0,21	0,44	0,25
<i>Valor promedio general</i>	0,16	0,51	0,10	0,23

Valores de explotación por grupos industriales

Donde VA es el valor ventas anuales o facturación anual.

Con los valores de los ratios puede realizar su estimación de los costes del producto y de los beneficios esperados, evaluando así la viabilidad de su desarrollo y fabricación.

La metodología propuesta para realizar la estimación de costes del producto y de los beneficios esperados se muestra a continuación.

Paso 1: Estimar el volumen de producción (n_{prod})

Para esta primera estimación se partirá de la situación en el mercado de la empresa promotora, del tipo de producto, de su grado de innovación, y de cuantos factores a considerarse estime oportuno. Éste punto de partida será el volumen de producción (la cuota de mercado) objetivo que espera vender la empresa, razonablemente, del nuevo producto.

Es necesario remarcar el grado de incertidumbre existente en esta estimación puesto que, a priori, se desconoce la situación futura de la empresa en el mercado, debido a la dificultad de predecir la coyuntura económica. Por ello todos los cálculos que se van a realizar para determinar los costes serán fiables en la medida en que se acierte con la coyuntura económica con la que se va a encontrar el producto durante el tiempo en que esté presente en el mercado. Para poder trabajar con esta incertidumbre se han de estudiar las distintas opciones, es decir, las posibles coyunturas del mercado, estimar las probabilidades de que se produzca una de ellas y finalmente, elegir de entre todas la que mejor expectativa tenga.

Paso 2: Precisar el precio de venta al público del producto

Estimar el coste de fabricación es difícil como ya ha sido comentado. Sin embargo, es relativamente sencillo fijar el precio de venta al público final objetivo del producto, en función de sus prestaciones, segmento, calidad e innovación, fundamentalmente analizando este punto en términos de competitividad en el sector.

Hay que tener en cuenta que la última imposición fiscal, el IVA, forma parte del PVP, por lo que a pesar de ser una cantidad que directamente paga el consumidor a las arcas públicas debe tenerse en cuenta al fijar un PVP competitivo puesto que puede suponer una cantidad importante.

Paso 3: Obtener precio de venta directa (PVD)

Para estimar el precio de venta directa de la empresa fabricante a los intermediarios o vendedores (caso de que la empresa fabricante no lo venda directamente al consumidor) ha de restarse el margen de beneficio del intermediario. Este margen es muy variable de un producto a otro y suele ser conocido por los fabricantes del sector.

A modo orientativa, los márgenes comerciales pueden oscilar entre valores próximos e incluso superiores al 100% (sector alimenticio, ocio, textil, etc.), entre un 40 y un 60% (bienes de consumo últimos) hasta entre un 15 y un 35% (bienes de equipo, herramientas, etc.).

Paso 4: Obtener el total de ingresos por ventas anuales (VA)

Para ello basta multiplicar el volumen de producción anual estimado por el precio de venta directa, es decir:

$$n_{prod} \cdot PVD = VA$$

Paso 5: Calcular inversión necesaria (CT)

Conocidas las ventas anuales estimadas, se calcula mediante el ratio a obtenida en tablas,

$$\frac{CT}{VA} = a \rightarrow CT = a \cdot VA$$

Paso 6: Calcular los costes fijos anuales (C_f)

- Mano de obra indirecta:

$$\frac{MOI}{VA} = b \rightarrow MOI = b \cdot VA$$

- Amortización anual (mediante V_m y CT): suponiendo amortización lineal de todos los equipos, obras e instalaciones, y partiendo del ratio V_m y de la inversión total CT, obtenemos:

$$Amortización = \frac{CT}{V_m}$$

- Otros (seguros, gastos financieros, etc.): estimado como un 7% de VA.

$$Otros = 0.07 \cdot VA$$

Paso 7: Calcular los costes variables anuales (C_v)

- Mano de obra directa:

$$\frac{MOD}{VA} = c \rightarrow MOD = c \cdot VA$$

- Materias primas:

$$\frac{M}{VA} = d \rightarrow M = d \cdot VA$$

Paso 8: Construir el diagrama de equilibrio

Para el valor prefijado de VA, se tiene la estimación de costes fijos y variables:

$$C_f = b \cdot VA + \frac{CT}{V_m} + 0.07 \cdot VA$$

$$C_v = c \cdot VA + d \cdot VA$$

Por otro lado, los ingresos en función del número de unidades producidas, suponiendo que se venden todas ellas, serán:

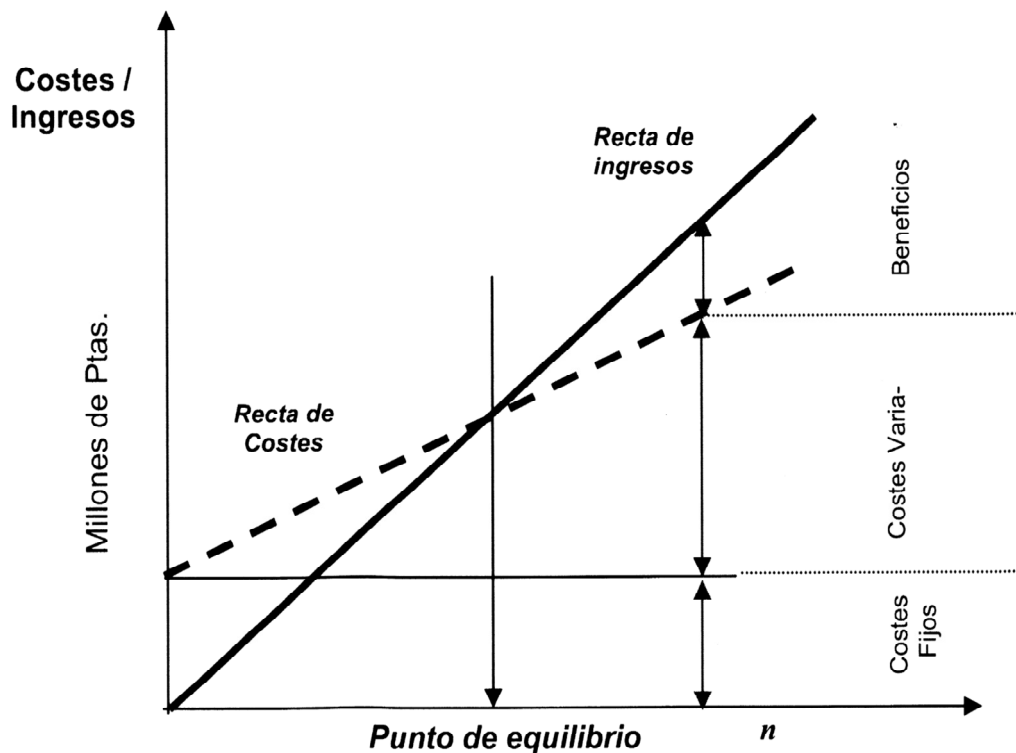
$$I = PVD \cdot n_{prod}$$

Con ello se puede construir el diagrama de equilibrio como sigue:

Se sitúan los valores de costes variables y costes fijos en un diagrama de costes y beneficios en función de n_{prod} , para el número prefijado de n . Por el punto suma de ambos costes pasará la recta de costes (suponiendo que variarán linealmente con el volumen de producción).

El término de costes fijos es independiente del número de unidades producidas, luego la recta cortará al eje de ordenadas en el valor de C_f . Puesto que se supone una variación lineal de los costes totales, la recta de costes pasará por el punto de corte con el eje de ordenadas y el punto correspondiente a los costes totales para VA.

La recta de ingresos es una recta dependiente PVD que pasa por el origen, luego con ello se obtendrá el diagrama de equilibrio y el punto de equilibrio correspondiente.



Paso 9: Evaluar la rentabilidad y viabilidad económica del producto

Con la obtención del punto de equilibrio se obtiene la situación esperada objetivo de ventas en relación a los costes. El margen de viabilidad lo marca por supuesto el número de unidades a vender tal que los beneficios superan a los costes. Si el punto obtenido está por debajo del punto de equilibrio se desprenderá que el precio de venta debe ser superior al estimado para alcanzar umbrales de rentabilidad. Si esto no fuera posible, el abandono del diseño es lo más recomendable.

Aún si el resultado fuese positivo, puesto que el número de unidades vendidas es una estimación, partiendo de un valor objetivo razonable, pero sujeto a variaciones importantes en función del comportamiento del entorno, de la aceptación del producto, etc., resulta conveniente obtener las expresiones de los beneficios en función del número de unidades producidas y vendidas para poder aplicar la técnica de decisión bajo riesgo o incertidumbre.

Paso 10: Obtener la función de beneficios y de costes en función del número de unidades producidas

Puesto que las expresiones de costes están en términos de VA, que se obtuvo estimando la producción determinada y un PVD, y utilizando ratios, es sencillo obtener una expresión de los costes e ingresos en función del número de unidades producidas y vendidas.

Esta expresión será de extraordinaria utilidad para obtener la función de costes y la función de beneficios como $f(n_{\text{prod}}, n_{\text{vend}})$, o abreviadamente $f(n_p, n_v)$ para poder aplicar técnicas de decisión.

Para ello no hay más que construir el proceso dejando en los términos de costes VA como $PVD \cdot n_p$ y en el de ingresos incluir $PVD \cdot n_v$. Si existe diferencia entre n_v y n_p , caso de producir más de lo que se puede vender, puede considerarse un precio de venta menor (precio de venta residual, PVR) para los excedentes, algo muy habitual cuando se da el caso.

De este modo se obtiene que:

$$\begin{aligned} \text{Costes:} & \quad Ct = Ct(n_p) \\ \text{Beneficios brutos:} & \quad B^o = n_v \cdot PVD + (n_p - n_v) \cdot PVR - Ct(n_p) \end{aligned}$$

Paso 11: Obtener la estimación del coste unitario del producto

Si en la expresión de los costes totales se divide por el número de unidades producidas, se obtiene el coste unitario de fabricación del producto.

Paso 12: Decidir mediante técnicas de decisión bajo riesgo o incertidumbre el volumen de producción

Con la expresión de la función de beneficios como $B^o = B^o(n_v, n_p)$ de sus beneficios combinando diferentes alternativas de volumen de producción con diferentes comportamientos del mercado, unidades vendidas (diferentes estados de la naturaleza).

La selección de los estados de la naturaleza es complicada y está enormemente influida por la empresa concreta con la que se esté trabajando. Para conocer un elevado nivel de precisión los estados de la naturaleza, se suelen emplear técnicas de Investigación Operativa. Estas técnicas no se van a trabajar en la asignatura pero sí se propone un método para seleccionar los diferentes estados de la naturaleza y basado en el conocimiento de dos variables: tipo de empresa promotora y el grado de innovación del producto. Según este método, las empresas promotoras se dividen en dos tipos: establecidas y de nueva creación, y los productos también se dividen en dos tipos: ya existentes en el mercado o innovadores. Para cada uno de los tipos de empresa y producto y basado en la experiencia, se estima el número de unidades mínimo y máximo que se podrían vender de la siguiente manera:

- Empresa promotora establecida y producto ya existente: $(n/2, 2n)$ y 8 valores intermedios.
- Empresa promotora establecida el producto absolutamente innovador: $(n/8, 2n)$ y 8 valores intermedios.
- Empresa de nueva creación y producto ya existente: $(n/4, 1.3n)$ y 8 valores intermedios.

- Empresa de nueva creación y producto absolutamente innovador: $(n/10, 1.3n)$ y 8 valores intermedios.

Con ello, y utilizando el criterio de decisión que se considere oportuno, se obtiene el volumen de producción a seleccionar teniendo en cuenta el riesgo y/o la incertidumbre de que se dé el valor objetivo de ventas prefijado inicialmente por la empresa en función de los datos del mercado.

Paso 13: Comprobación final con el diagrama de equilibrio

Por último con el valor seleccionado finalmente, se comprueba el diagrama de equilibrio que supere al Punto de Equilibrio, evaluando los beneficios que se obtienen o asegurando la superación del punto de equilibrio.

Toma de decisiones bajo incertidumbre

Introducción a la toma de decisiones

El proyectista realiza durante todo el proceso de diseño una sucesión de actividades de divergencia y convergencia respecto al problema que resolver, siendo las fases de convergencia aquellas en las que se evalúan las alternativas para escoger la más prometedora, para centrarse en la solución escogida. Por lo tanto, durante todas las etapas del proyecto hay que estar evaluando alternativas o cursos de acción y tomando decisiones, algunas de las cuales resultan críticas para etapas posteriores del proyecto. Por ello en este apartado se va a introducir el estudio del proceso de toma de decisiones.

Elección de la mejor alternativa en función del ambiente de decisión

En primer lugar se definirá la matriz de decisión con la que se va a trabajar y los parámetros que en ella intervienen, para pasar posteriormente a definir los distintos ambientes de decisión con los que trabajar.

		ESTADOS DE LA NATURALEZA								
		E ₁	E ₂	E ₃	.	.	.	.	.	E _m
ALTERNATIVAS	A ₁	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	.	.	.	.	.	R _{1m}
	A ₂	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	.	.	.	.	.	R _{2m}
	.									
	.									
	A _n	R _{n1}	R _n	R _{n3}	.	.	.	.	.	R _{nm}

Matriz de decisión

Donde:

- E_j: los posibles estados de la naturaleza (posibles escenarios futuros, dependientes de variables del entorno fuera del control del decisor).
- A_j: las distintas alternativas o productos a evaluar.
- R_{ij}: los resultados de que se produzca la estrategia *i* cuando se da el estado de la naturaleza *j*. Los resultados, dado que se está evaluando en función del criterio económico, pueden ser tanto los beneficios de la empresa como los costes. Hay que tener en cuenta que, si el resultado que está siendo tomado

como criterio de decisión son los beneficios, expresados con el indicador que sea, el valor de R será mejor cuanto mayor sea (maximización), mientras que si se toma como criterio los costes, R será mejor cuanto más bajo sea su valor (minimización).

Los posibles ambientes de decisión con los que se puede encontrar el proyectista se describen a continuación, explicándose en cada caso, cuál es el método para elegir la alternativa óptima.

Decisión en ambiente de certidumbre

Son conocidos con certeza los estados de la naturaleza y por tanto los resultados o consecuencias establecidos para cada alternativa y estado de la naturaleza. En este caso, para elegir la mejor alternativa, simplemente se ha de elegir aquella que permita obtener los mejores resultados.

Decisión en ambiente de riesgo

En este caso, se conocen las probabilidades de que se den cada uno de los diferentes estados de la naturaleza mediante la utilización de métodos específicos. Esta información, que permite asignar probabilidades a los posibles comportamientos del entorno, proviene habitualmente del conocimiento pasado de situaciones análogas. Para obtener una información detallada sobre los distintos métodos existentes se recomienda consultar [Rios-89]. Cuando se dispone de esta información, es evidente que debe utilizarse como elemento importante en la toma de la decisión, aun asumiendo el riesgo de una asignación inexacta e incluso la errónea de estas probabilidades.

Admitiendo pues esta posibilidad de valorar objetiva o subjetivamente la probabilidad de que se dé cada estado de la naturaleza, el método de selección se basa en escoger la alternativa que mejor Valor Medio Esperado obtenga:

Si $p(E_j)$ es la probabilidad estimada de que se dé el estado de la naturaleza j , entonces se calcula el valor medio esperado para cada una de las alternativas de la siguiente manera:

$$VME(S_i) = \sum_{j=1}^m p(E_j) \cdot R_{ij}$$

Se calcula el VME para cada una de las n alternativas, siendo la mejor de todas ellas aquella con la que se obtiene el valor máximo de VME.

Decisión en ambiente de incertidumbre

Esta situación es aquella donde no existe información sobre los estados de la naturaleza. Por ello se deben buscar métodos para asignar las probabilidades.

En primer lugar hay que remarcar que se está hablando de una probabilidad subjetiva, puesto que ésta va asociada al grado de creencia de un observador en que se realice un determinado suceso posible en una cierta situación. Al asignar probabilidades subjetivas se trata de medir la creencia que una persona de comportamiento coherente tiene en que un suceso se realice, teniendo en cuenta la información de la que dispone.

Existen diversos métodos de asignación de probabilidades subjetivas, algunos de los más recomendados en la bibliografía se presentan a continuación:

- *Criterio de Laplace*: consiste en suponer que ante la ignorancia completa respecto al peso relativo de los estados de la naturaleza, todos ellos son equiprobables, es decir, todos ellos tienen una probabilidad de suceder de $1/m$ (puesto que se tiene m posibles estados de la naturaleza). Por lo tanto, la decisión bajo incertidumbre se ha transformado en una decisión bajo riesgo y por ello se calcula de manera análoga a la descrita en apartado anterior:

El método de selección se basa en escoger la alternativa que mejor Valor Medio Esperado obtenga:

$$VME(S_i) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} \cdot R_{ij}$$

Se calcula el VME para cada una de las n alternativas, siendo la mejor de todas ellas aquella con la que se tiene el máximo valor de VME.

- *Criterio maximin de Wald*: se trata de un criterio que se puede calificar de prudente o pesimista. En él se recomienda seleccionar para cada alternativa el peor resultado posible (máximo coste o mínimo beneficio, según se trate), y de entre estos peores resultados, se selecciona el mejor desenlace.
- *Criterio de Hurwicz*: se define una constante ($0 < a < 1$) que mide el grado de optimismo del decisor (optimismo máximo para $a = 1$ y pesimismo máximo para $a = 0$). Para cada alternativa S_i se determina el $\max R_{ij} = M_i$ y el $\min R_{ij} = m_i$. Se elige entonces la alternativa S_i para la cual $aM_i + (1-a)m_i$ sea máximo. Para $a = 0$ este criterio se reduce al de Wald, y para el caso de $a = 1$ tendremos un criterio maximax u optimista.
- *Criterio de Savage*: se define la matriz de penalidades o déficits como aquella que mide la diferencia negativa entre el beneficio que realmente se obtiene y el que podría haberse obtenido si el verdadero estado de la naturaleza hubiese sido conocido:

$$P_{ij} = \max_k R_{kj} - R_{ij}$$

A esta nueva matriz se le aplica el criterio maximin, es decir, se elige la alternativa para que el $\min P_{ij}$ sea máximo.

Toma de decisiones multicriterio

Objetivo

Evaluar los distintos diseños obtenidos durante las fases de generación de soluciones en base a una serie de criterios, para poder elegir la propuesta óptima.

Definición

En multitud de ocasiones, en los contextos más diversos, profesionales y no profesionales, la toma de decisiones sobre un conjunto de alternativas, estrategias,

etc., resulta muy habitual. El consumidor realiza una opción de compra, el responsable económico de una empresa se decanta por una opción estratégica dada una determinada situación financiera en el presente y unas previsiones de futuro. En el ámbito de la ingeniería, el profesional debe enfrentarse a la toma de decisiones en diversas fases y frente a problemas de distinta naturaleza.

Sin embargo, frente a la gran diversidad de decisiones a tomar y las diferentes formas de presentarse un problema y sus posibles alternativas de solución, no resulta corriente el uso de algún método herramienta de apoyo a la resolución de tal disyuntiva. De este modo, un gran número de decisiones, entre ellas también decisiones técnicas, decisiones empresariales, en definitiva, profesionales, se apoyan en la experiencia del decisor o la semejanza a decisiones anteriormente llevadas a buen término.

Profesionales de ingeniería se enfrentan continuamente con la necesidad de optar sobre alternativas de resolución en dimensiones muy diferentes, que van desde lo económico, hasta el ámbito tecnológico. En el proceso de diseño de productos industriales aparece el problema de la decisión en diversas fases. Desde alternativas preliminares en productos o en subsistemas de los mismos en la fase de diseño conceptual hasta la elección de alternativas en aspectos de detalles en fases posteriores. Las decisiones en determinada fase de diseño condicionan el trabajo de fases posteriores. Los errores producidos por estas decisiones pueden suponer un alto coste en el proceso.

Para poder reducir el riesgo de error en estas situaciones, la utilización de métodos y herramientas permitirá al decisor evaluar numéricamente las distintas alternativas de diseño existentes con la finalidad de ayudarle a seleccionar la mejor de todas ellas en función de los objetivos que tenga planteados. Resolviendo el problema matemático planteado se obtiene la solución, la cual, tras ser sometida a un proceso de validación, quedará dispuesta para su implantación.

Desarrollo de la técnica

Planteamiento de la matriz de valoración

El planteamiento del problema de decisión multicriterio se realiza mediante una matriz de decisión cuyos elementos son los siguientes:

- C_i : Criterios de decisión, son objetivos de diseño o direcciones en las que el diseñador debe esforzarse para hacer mejor las cosas.
- A_i : Alternativas, son el conjunto de soluciones, estrategias, acciones decisiones, etc., posibles que hay que analizar durante el proceso de resolución del problema de decisión que se considere.
- R_{ij} : Resultados, es la valoración que se le da a la alternativa A_j desde el punto de vista del criterio C_i .
- P_i : Pesos, es la importancia relativa de cada criterio.

El enunciado clásico de un problema de toma de decisiones multicriterio es una Tabla de Valoración, que contiene los criterios en las columnas y las distintas alternativas en filas. En las intersecciones de las filas y las columnas se indica la valoración de la alternativa de esa fila respecto al criterio de la columna:

		CRITERIOS DE DECISIÓN							
		C ₁	C ₂	C ₃	.	.	.	.	C _n
ALTERNATIVAS	A ₁	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	.	.	.	.	R _{1n}
	A ₂	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	.	.	.	.	R _{2n}
	.								
	.								
	A _m	R _{m1}	R _{m2}	R _{m3}	.	.	.	.	R _{mn}

Matriz de valoración

Además de llevar asociado una matriz de pesos para los distintos criterios:

C ₁	C ₂	...	C _i	...	C _n
P ₁	P ₂	...	P _i	...	P _n

Las técnicas de decisión multicriterio discretas tratan, pues, de facilitar la toma de una decisión en la que influyen en distinta medida diferentes criterios o factores. En su fundamento tratan de recoger toda la información expresada en el planteamiento anterior: la opinión o valoración del decisor de cada alternativa desde cada uno de los puntos de vista (criterios) teniendo en cuenta la importancia de cada criterio (pesos).

A la hora de tomar decisiones de diseño aparecen las siguientes características típicas:

- Varias propiedades que juegan un papel en la decisión están medidas en diferentes escalas (Ej.: Km/h, W, Kg, etc.)
- Algunos criterios son cuantitativos (Ej.: precio, vida de servicio) y otros cualitativos (Ej.: confort)
- No todos los criterios son igualmente importantes, cada decisor los valora de una forma.
- No hay una solución dominante: para ninguna alternativa son todas las propiedades mejores que para el resto de ellas.

Ejemplo:

	Precio	Confort	Peso (Kg)	Adaptable sin herramientas?	Estética	Vida media (años)
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
A ₁	7500	++	10	No	Razonable	4
A ₂	5500	+	13	No	Mal	7
A ₃	9500	+++	20	Sí	Bien	5

Decisión de diseño para una silla (Roozenburg-97)

Analizando la tabla anterior, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Desde el punto de vista de precio, la mejor alternativa es A2.
- Desde el punto de vista del confort, la mejor alternativa es A3.
- Desde el punto de vista del peso, la mejor alternativa es A1.
- El confort no se puede valorar numéricamente.
- A la pregunta “adaptable sin herramientas” sólo se puede responder sí/no.

Por todo ello se puede concluir que para determinar cuál es la mejor alternativa no sólo hay que valorar cada una de ellas para cada criterio, sino que hay que determinar cómo se podrán tener en cuenta todas las valoraciones a la vez.

A ello se van a describir a continuación algunas técnicas que permitirán concluir cuál es la mejor alternativa, teniendo en cuenta los criterios analizados. Las técnicas se presentan por orden de su complejidad, es decir, se empieza describiendo las más intuitivas para acabar con las que llevan implícitos más cálculos.

Técnicas de evaluación multicriterio

1. Técnicas básicas

Regla conjuntiva

Consta de tres pasos:

- Determinar para cada criterio cierto nivel de aspiración.
- Examinar de manera aleatoria todas las alternativas.
- Elegir la primera alternativa que cumpla con todos los niveles de aspiración.

Para el caso del ejemplo planteado en la tabla anterior, se podrían determinar los siguientes niveles de aspiración: confort = medio, precio = no mayor de 10.000, vida como mínimo de cinco años. Para el resto de criterios no se determinan aspiraciones mínimas.

Aplicando ahora la regla conjuntiva se elige de modo aleatorio la alternativa:

- A1: cumple el confort, cumple el precio pero no cumple la vida mínima. Queda descartada.
- A3: cumple el confort, cumple el precio y cumple la vida mínima. Era elegida esta alternativa.

Eliminación por aspectos

Se realizan los siguientes pasos:

- Se establece un cierto nivel de aspiración para cada criterio (unos mínimos).
- Se examinan las distintas alternativas para cada criterio en orden de importancia del criterio (por filas).
- Cada vez que las alternativas no satisfagan el nivel de aspiración se eliminan.
- El proceso finaliza cuando han sido eliminadas todas las alternativas excepto una, que es la que se elige.

Aplicando ahora la regla de eliminación por aspectos con los criterios mínimos definidos en el apartado anterior y considerando que el criterio más importantes del precio, seguido del confort y seguido de la vida media:

- C1: Lo cumplen las tres alternativas.
- C2: no lo cumple la alternativa A2 y las otras dos sí. Se elimina la alternativa A2.
- C6: a la cumbre la alternativa A1 espacio mientras que la A3 sí. Se elimina la alternativa A1.
- Queda elegida la alternativa A3.

Regla disyuntiva

Se realizan los siguientes pasos:

- Identificar cada alternativa con su mejor propiedad (en general una propia distinta para cada alternativa).
- Elegir la alternativa según la que se considere más importante de todas las mejores propiedades.

Ejemplo:

- El reloj A es el más barato.
- El reloj B es el que tiene mayor número de funciones.
- El reloj C es la más bonita.

El encargado de la toma de decisiones elige el reloj A porque prefiere que sea barato a que sea bonito o que tenga muchas funciones.

2. Técnicas cualitativas

Son técnicas en las cuales se mide el grado de satisfacción de los distintos criterios en una escala ordinal y se clasifican los criterios por orden de importancia.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
Ranking del criterio	2	1	4	6	3	5
A ₁	2	2	1	2	2	3
A ₂	1	3	2	2	3	1
A ₃	3	1	3	1	1	2

Puntuación de cada alternativa en función de todos los criterios

Donde el valor 1 significa que es la alternativa más efectiva y el valor 3 la menos efectiva para cumplir un criterio.

Al utilizar un método de tipo cualitativo sucede lo siguiente:

- Las puntuaciones obtenidas no se suelen sumar, pues están definidas en una escala cualitativa.
- Las posiciones en dicha escala sólo dan información de su clasificación frente a las otras alternativas y no sobre las diferencias absolutas en eficiencia entre las propiedades evaluadas de cada alternativa.

Existen unas técnicas que ayudan a utilizar correctamente los datos de la tabla anterior. Se trata de reglas para elaborar automáticamente la decisión de elegir el diseño alternativo óptimo:

La regla de la mayoría

Se eligió la alternativa más efectiva para el mayor número de criterios. Para ello se comparan las alternativas de dos en dos y se elige la mejor de cada pareja:

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	De acuerdo con la regla de la mayoría
A ₁ - A ₂	A2	A1	A1	-	A1	A2	V(A1) > V(A2)
A ₂ - A ₃	A2	A3	A2	A3	A3	A2	V(A2) = V(A3)

$A_3 - A_1$	A1	A3	A1	A3	A3	A3	$V(A_3) > V(A_1)$
-------------	----	----	----	----	----	----	-------------------

Aplicación de la regla de la mayoría

Comparando A1 y A2 se obtiene que A1 es más veces mejor solución que A2, luego se considera de mayor valor. Comparando A2 y A3 se obtiene que ambas tienen valores equivalentes. Comparando A3 y A1 se obtiene que A3 tiene mayor valor que A1.

Los resultados anteriores nos llevan a obtener dos conclusiones opuestas. Se trata de una paradoja que ha sido bautizada con el nombre de *Paradoja de Arrow*.

Otra dificultad adicional a la hora de aplicar esta regla es que para cada criterio se elige la mejor alternativa de entre dos, independientemente de la diferencia de posiciones que haya entre ellas. Por eso, si la diferencia entre propiedades de las alternativas es grande, la regla de la mayoría no es realista.

La regla de Copeland

Se trata de una variante de la regla de la mayoría que evita el problema de la no-transitividad del ranking de alternativas. La regla dice que el número de veces que una alternativa, en comparación con las otras, tiene preferencia de acuerdo con la regla de la mayoría, es una medida para el valor de la alternativa, véase tabla xx.

	A ₁	A ₂	A ₃	Σ	Posición
A ₁	-	1	-2	-1	2
A ₂	-1	-	0	-1	2
A ₃	2	0	-	2	1

Esta regla fuerza establecer un ranking de alternativas, aunque de todos modos no tiene en cuenta la distancia entre dos posiciones.

La regla de la suma de ratios

Se trata de sumar para cada alternativa todos los ratios obtenidos en la tabla inicial.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	Σ	Posición
A ₁	2	2	1	2	2	3	12	2
A ₂	1	3	2	2	3	1	12	2
A ₃	3	1	3	1	1	2	11	1

Este modo también se obtiene una clasificación de las distintas alternativas.

La regla lexicográfica

Se trata de clasificar los criterios en función de su importancia relativa para evaluar las alternativas respecto al criterio más importante. De este modo se elige la alternativa que cumpla mejor el primer criterio, independientemente de cómo satisfaga el resto de los criterios. Sólo en el caso de que más de una alternativa satisfaga de igual manera el primer criterio, se evalúa cuál de ellas satisface mejor el segundo criterio y así sucesivamente.

Analizando los datos de la tabla inicial se obtiene que la mejor alternativa es la 3 ya que el criterio más importante es el 2.

El método DATUM [Pugh-94]

Es una alternativa a los métodos cuantitativos, desarrollada por Pugh como una variación informal de la regla de la mayoría.

Se realiza en las siguientes etapas:

1. Elegir una de las soluciones alternativas como DATUM o base de comparación.
2. Comparar la adaptación a cada objetivo de cada solución alternativa en relación con el "Datum". Si la solución cumple mejor que el objetivo, se coloca un signo (+), que se adapta peor si se pone un signo (-) y si no existe gran diferencia en su adaptación se pone un (=).
3. Calcular por separado la suma de signos (+), de signos (-) y de (=), para cada alternativa y estos resultados sirven de base para tomar una decisión suficientemente fundamentada.
4. Muchas veces suele ser necesario elegir un nuevo "Datum" y repetir los pasos 3 y 4 para clasificar mejor las ideas.

Ejemplo: elección del mejor modelo nuevo de silla a fabricar de entre cuatro posibles.

	Modelo actual	Integral	Provenzal	Styl	Confort
Facilidad de montaje	*	-	=	+	+
Estética	D	=	+	+	+
Estabilidad	A	-	+	=	=
Confort	T	=	=	-	+
Ligereza	U	+	.	+	=
Vida media	M	+	+	+	+
Coste de fabricación	*	-	=	=	=
$\sum +$		2	3	4	4
$\sum -$		3	1	1	0
Total		-1	2	3	4

Ejemplo de aplicación del método Datum para elegir el modelo de silla fabricar

Según la tabla anterior el modelo nuevo de silla que va a fabricar la empresa es el modelo confort.

3. Técnicas cuantitativas

En todos los métodos de tipo cualitativo parece que existen problemas a la hora de tomar decisiones. La dificultad principal es que los datos originales no se pueden sumar para obtener una puntuación total.

Este problema no surge si el valor de la síntesis se deja para el que toma la decisión, como el caso del método de Pugh, pero entonces puede que esta persona tenga dudas debido a que existen demasiados criterios y/o demasiadas alternativas.

Por todo ello se presenta a continuación un método en el cual se mide el grado de satisfacción de los distintos criterios en una escala cardinal, permitiendo al responsable de la toma de decisiones cuantificar sus juicios de valor sobre la eficiencia de las alternativas y la importancia de los criterios en una escala de intervalos conocidos.

Existen multitud de métodos cuantitativos de ayuda a la decisión, pero dado que la mayoría de ellos entrañan una compleja resolución numérica, no se van a tener en cuenta.

Técnica de la suma ponderada

Se trata de una técnica basada en dotar a las alternativas y criterios de diferencias cuantificables, expresados en función de unas escalas.

Para valorar los criterios es necesario realizar un análisis de los factores de entorno que inciden y de algún modo condicionan el proceso. Existe una amplia bibliografía en relación a este tipo de análisis, pero en este caso se centrará en la integración de las conclusiones derivadas del estudio de los factores de entorno en el proceso de decisión.

La *elección de los factores* a considerar constituye el primer paso. En este sentido no existe un modo único de proceder. Existen diferentes fuentes, planteamientos, clasificaciones, etc. que pueden asistir al equipo de trabajo a la hora de establecer un listado de los principales factores de influencia detectados. Una buena referencia de apoyo en este aspecto la constituye el capítulo dedicado a los factores en [Gómez-Senent-97].

Los *pesos de los criterios* tienen como objeto presentar la importancia relativa que la unidad decisoria otorga a cada criterio. El problema clave que se plantea en este punto es responder a cómo se va a asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro. Existen dos estrategias:

- *Asignación directa*: frente una escala definida que correlaciona valores de grado con valores numéricos. Por ejemplo: expresión de preferencias tales como “más importante” o “alto” asignadas a valores (alto = 3, medio = 2 y bajo = 1).
- *Asignación indirecta*: mediante técnicas de comparación entre criterios. Por ejemplo: mediante matrices de comparación o dominación. La descripción exhaustiva estos métodos se puede consultar en [Gómez-Senent-97].

Una vez determinada la ponderación de los criterios, se procede a la valoración de cada alternativa frente a cada criterio. Esta se traduce en el establecimiento de una correspondencia entre el valor cualitativo que el decisor da a una alternativa respecto de un criterio determinado y un valor numérico: la definición de una función de utilidad. Para ello se puede utilizar los mismos hitos de asignación que se han descrito para los criterios. Por ejemplo la escalada de Saaty:

- 9 = satisface el criterio muy bien
- 8, 7, 6 = satisface el criterio bien
- 5 = satisface el criterio razonablemente bien
- 4, 3, 2 = satisface el criterio moderadamente
- 1 = Satisface el criterio bastante mal/muy mal

Este modo se consigue que la eficiencia para cada criterio se puntúan en una única escala.

Esta técnica se aplica de la siguiente manera:

- Se asigna a cada criterio un valor de ponderación λ_j : al criterio más importante se le asigna el valor de ponderación más alta
- Se valora cada alternativa frente a cada criterio e_{ij}
- El valor total de cada alternativa se calculó de la siguiente forma:

$$V(A_i) = \sum \lambda_j e_{ij}$$

Con esta regla de decisión se consigue que el valor total de cada alternativa se determine más por la eficiencia de las propiedades importantes que por las menos importantes.

Ejemplo: elección del mejor modelo nuevo de silla fabricar de entre cuatro posibles.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	$\sum \lambda_j e_{ij}$	
	Facilidad de montaje	Estética	Estabilidad	Confort	Ligereza	Vida media	Coste fabricación		
λ_j (%)	5	25	10	15	10	5	30		
Integral	3	6	3	5	8	6	3	470	4
Provenzal	4	9	6	6	4	8	5	625	2
Styl	8	7	5	4	9	6	4	565	3
Confort	7	8	4	9	6	8	6	690	1

Aplicación del método de la suma ponderada a la elección de una silla para fabricar

Según la tabla anterior el modelo nuevo de silla que va a fabricar la empresa es el modelo confort.