

Un método de análisis jerárquico para anticipar la selección de la estrategia de aprovisionamiento en la fase de diseño

An analytic hierarchy method for anticipating the selection of the supplying strategy at the design stage



Marco Mandolini¹, Claudio Favi² y Michele Germani¹

¹ Università Politecnica delle Marche. Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Via Brecce Bianche, 12 – 60131 Ancona (Italia)

² Università di Parma. Dipartimento di Ingegneria ed Architettura. Parco Area delle Scienze, 181/a – 43124 Parma (Italia)

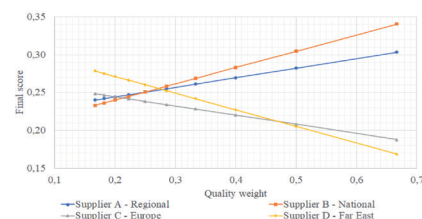
DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8891> | Recibido: 03/07/2018 • Inicio Evaluación: 04/07/2018 • Aceptado: 01/10/2018

ABSTRACT

- The selection of cost-efficient supplying strategy is a process that involves different aspects, most of them linked with the design phase. Usually, this activity is performed at the procurement stage and does not engage designers and engineers who have drawn up the quality and cost characteristics of products. The paper presents a simplified analytic hierarchy process (AHP) for the concurrent evaluation of economic and quality factors of different supplying strategies. The goal of the AHP is to provide a tangible tool for designers and engineers for comparing supplying alternatives early in the design process. The hierarchy approach is used to organize objectives, criteria and alternatives according to priorities. A complex assembly of a machine tool has been analysed as a case study and four different suppliers with different features have been investigated using the AHP. Results highlight that, even if the lowest production cost can be obtained with Far East suppliers, considering quality criteria, national or local suppliers turn out to be the more appropriate and robust choice. The sensitivity analysis is beneficial to understand the level of confidence associated with the selection of one supplier in comparison with the other supplying strategies.
- **Keywords:** Analytic Hierarchy Process; Manufacturing Strategy; Supplier Selection; Vendor Rating; Product Design.

RESUMEN

La selección de una estrategia rentable de aprovisionamiento es un proceso que implica diferentes aspectos, la mayoría de ellos ligados a la fase de diseño. Por lo general, esta actividad se realiza en la fase de aprovisionamiento y no involucra a diseñadores e ingenieros que hayan elaborado las características de calidad y coste de los productos. Este documento presenta un proceso de análisis jerárquico (AHP) simplificado, para la evaluación concurrente de factores económicos y de calidad de diferentes estrategias de abastecimiento. El objetivo del AHP es proporcionar una herramienta tangible para los diseñadores e ingenieros que permita comparar las alternativas de suministro en las primeras etapas del proceso de diseño. El análisis jerárquico se utiliza para organizar los objetivos, criterios y alternativas de acuerdo con una serie de prioridades. Para ello, se ha analizado como caso de estudio el de un montaje complejo de una máquina-herramienta, investigándose a cuatro proveedores distintos con características diferentes utilizando el AHP. Pese a obtener un menor coste de



producción con proveedores de Extremo Oriente, los resultados ponen de relieve que los proveedores nacionales o locales resultan ser la opción más apropiada y sólida al tener en cuenta los criterios de calidad. Asimismo, el análisis de sensibilidad es útil para entender el nivel de confianza asociado con la selección de un proveedor en comparación con las otras estrategias de suministro.

Palabras clave: proceso de análisis jerárquico, estrategia de fabricación, selección de proveedores, calificación de proveedores, diseño de productos.

1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

El desarrollo de la etapa de diseño del producto es un proceso iterativo y largo para determinados productos. Las actividades de la fase de diseño pueden dividirse en cuatro fases principales: (i) Configuración y análisis de las necesidades del cliente, (ii) Diseño conceptual, (iii) Generación del diseño, y (iv) Diseño detallado [1]. Es bien sabido que, aunque los costes de diseño representan aproximadamente el 10% del presupuesto total de un proyecto nuevo, normalmente el 80% de los costes de fabricación son determinados por el propio diseño del producto [2]. Los costes de fabricación y ensamblaje se determinan durante la fase de diseño, puesto que las decisiones que se toman en este punto tienden a afectar a la selección de los materiales, las máquinas-herramientas y los recursos humanos que deben ser utilizados en el proceso de producción [3]. La selección del proceso de fabricación y el proveedor más adecuado depende de muchos factores. El diseño para la fabricación y ensamblaje (DfMA) se define como una aproximación para el diseño de un producto donde: (i) el diseño pasa rápidamente a la fase de producción, (ii) el producto está fabricado con un coste mínimo, (iii) el producto se fabrica con el mínimo esfuerzo en términos de requisitos de manipulación y procesamiento, y (iv) el producto manufacturado alcanza el nivel diseñado de calidad. Todos estos factores deben ser contabilizados durante el desarrollo del producto, así como otros para apoyar la toma de decisiones, incluidos los requisitos mínimos para la selección de proveedores [5] [6].

Normalmente, proveedores y cadenas de suministro se seleccionan según un sencillo marco de referencia: (i) la fiabilidad de los proveedores, (ii) la asociación consolidada a lo largo del tiempo, (iii) las soluciones costo-efectivas y (iv) el conocimiento de los proveedores sobre normas de calidad y de requisitos de la empresa [7]. Además, la selección de proveedores no es una actividad realizada en el nivel de diseño, sino que depende del departamento de

compras [8]. Esta práctica habitual conlleva a empresa y proveedores a iniciar un proceso de negociación, que no puede ser considerado como un verdadero proceso de selección de proveedores [9]. En este contexto, las estrategias de suministro no siguen ningún enfoque estructurado, lo cual implica la carencia de reglas de diseño y de criterios objetivos. En este contexto, el coste de producción puede ser considerado como el principal factor que afecta a la estrategia de suministro. DfMA convierte la mayor parte de la información de fabricación en índices de costes, normalizando eficazmente información diferente y haciendo posibles comparaciones directas [10]. Sin embargo, este tipo de información está relacionado con las características del producto/componente y no con las oportunidades ofrecidas por el proveedor. La evaluación de una estrategia de suministro se realiza sólo después de que el proyecto/diseño es finalizado. Este enfoque conduce a las siguientes eventualidades:

- que el coste o el tiempo de entrega estimado durante la fase de diseño no pueda ser respetado porque la estrategia efectivamente difiera de la estimada [11];
- que a los diseñadores se les pida forzar demasiado el producto (por ejemplo, adoptando soluciones extremas) con vistas a respetar el precio objetivo, cuando ese objetivo puede lograrse fácilmente con una estrategia de suministro diferente [12].

Para afrontar estas cuestiones, varios autores proporcionaron modelos basados en la gestión de costes entre organizaciones, con el objeto de identificar formas innovadoras que reduzcan el coste de producción de los productos suministrados por la cadena [13] [14]. Los resultados obtenidos por la adopción de estos modelos son: (i) alcanzar un coste mínimo global de producción en lugar de una serie de costes mínimos locales, y (ii) compartir información sobre el producto entre todas las empresas involucradas en la cadena [15]. La forma para permitir a las empresas una mejor gestión de costes entre las organizaciones es un pre-requisito para anticipar la selección de la estrategia de suministro en la fase de diseño. Por tanto, es importante considerar escenarios de producción económicamente ventajosos durante la fase de diseño, como ciertas estrategias de suministro que podrían afectar significativamente (positiva o negativamente) en el coste de producción (a veces incluso más que lo que un diseñador podría conseguir) [16]. La consideración únicamente de costes de fabricación, sin embargo, pueden conducir a conclusiones erróneas [17]. Aspectos relacionados con la calidad de un suministro, tales como el tiempo de entrega o el incumplimiento en el abastecimiento, podría efectivamente excluir o penalizar ciertas estrategias de contratación [18]. En este sentido, es necesario adoptar criterios múltiples y simplificados en las estrategias de evaluación (por ejemplo, coste de producción y calidad), pero durante los primeros años de diseño. El análisis de decisión multi-criterio (MCDA) considera varios criterios juntos en el entorno de la toma de decisiones. Hay muchos métodos de MCDA, como el *Analytic Hierarchy Process* (AHP), Decisión Experto (DEX), Técnica Simple de Calificación Multi-Atributo (SMART), Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS), etc. [19]. Algunos ejemplos están disponibles en la literatura donde se proponen métodos para formalizar los criterios para la selección de proveedores [20][21][22]. Sin embargo, estos planteamientos son demasiado detallados y su integración en el proceso de desarrollo del producto muestra algunas limitaciones. De hecho, tales métodos son ampliamente utilizados en la fase de adquisición pero no son aptos para ser utilizadas durante la fase de diseño del producto debido al alto nivel de detalle y de datos

que son necesarios.

Este documento tiene por objeto presentar un sistema simplificado del *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para la evaluación simultánea de factores económicos y de calidad según diferentes estrategias de suministro. El objetivo del AHP es proporcionar un instrumento tangible para la comparación temprana de alternativas de suministro en el proceso de diseño. El AHP se basa en una aproximación numérica mediante criterios estructurados con vistas a obtener una evaluación global de cada alternativa de suministro. De esta manera, aplicando el método AHP, el tomador de decisiones (por ejemplo, los ingenieros y diseñadores) puede elaborar una lista con la clasificación de posibles alternativas, que se basa en una ponderación asignada a cada criterio y, a continuación, elegir la mejor alternativa. La aproximación analítica descompone el problema de decisión en sus elementos constitutivos (es decir: criterios de selección y alternativas). La discretización jerárquica de estos elementos se representan gráficamente por medio de un árbol: en la parte superior está el objetivo (para lo cual se elige la mejor alternativa entre las disponibles) y, a continuación, los criterios y subcriterios que son ramificados. El número de niveles en el árbol no es fijo, pues puede variar según el problema de decisión que requiera ser resuelto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de análisis jerárquico es una aproximación para la toma de decisiones utilizado comúnmente en la gestión de problemas complejos, que se han simplificado por una serie de comparaciones entre un conjunto de alternativas. Este método permite encontrar la mejor alternativa según unos criterios seleccionados. La elección del AHP entre los diferentes métodos de análisis de decisión multi-criterio (MCDA) ha sido impulsada por las ventajas de esta técnica en relación con la finalidad de este trabajo de investigación [23]. De hecho, considerando el contexto del diseño de productos, la gran cantidad de criterios relativos a la evaluación de las estrategias de suministro, así como su alto nivel de abstracción, el AHP se muestra como un método cuantitativo flexible para seleccionar la mejor alternativa de acuerdo a su rendimiento relativo a múltiples criterios de interés. La adopción del AHP en este contexto, permite al gestor que toma la decisión a estructurar visualmente los problemas en forma de una jerarquía de atributos y combinar la información cuantitativa y cualitativa sobre problemas de toma de decisiones. Además, el método AHP involucra a un procedimiento matemático relativamente complejo, la posibilidad de desarrollar herramientas sencillas para la evaluación global de valoraciones y la posibilidad de reducir la inconsistencia del método de evaluación.

Siguiendo el procedimiento AHP, el decisor pondera cada uno de los criterios utilizados por el AHP según una comparación por pares (la importancia de un criterio es directamente proporcional a su peso). A continuación, para cada criterio, el decisor da una valoración para las alternativas disponibles (cuanto mayor sea la puntuación, mejor es la alternativa que se ajusta al criterio). Por último, el AHP calcula una puntuación final para cada alternativa, combinando su puntuación y el peso de cada criterio. De esta manera, el tomador de decisiones puede seleccionar la estrategia con la mayor puntuación global.

El encargado de la toma de decisiones, en el contexto de esta investigación, es el diseñador de producto. Sin embargo, cabe destacar que los criterios y pesos relativos son establecidos por un equipo de ingenieros que representan al departamento de diseño (quién sabe del producto), la industrialización (quién sabe de los

procesos de fabricación) y compras (quién sabe de los proveedores). El número de miembros pertenecientes a este equipo depende de la organización empresarial y los productos (por ejemplo, cantidad de líneas de productos, complejidad de estos, dimensión de la cadena de suministro, etc.).

El primer paso del método (Fig. 1 en el material complementario) consiste en la definición de los criterios de evaluación y las alternativas. Los métodos de selección de proveedores disponibles en la literatura considera varios criterios, tales como "la capacidad del proveedor en la planificación de la producción" [24], "capacidad de fabricación del proveedor" [25], la mejora continua del proveedor "Capacidades" [26] y "proveedor tecnológico, financiero y capacidades organizativas" [27]. Desafortunadamente, la mayoría de esos criterios no pueden ser evaluados durante la fase de diseño del producto (falta de datos) o su evaluación no es significativa (no es tan importante identificar exactamente al proveedor, como sí identificar una estrategia de suministro).

Según un estudio de Verma y Pullma [28], aunque la calidad es percibida como el atributo más importante, el coste de producción y el tiempo de entrega son los criterios con mayor peso. Los criterios utilizados en este trabajo fueron seleccionados teniendo en cuenta aquellos más importantes de los señalados por la revisión de la literatura y de aquellos que pueden ser cuantitativamente evaluados en la fase de diseño. Posteriormente, los criterios fueron jerárquicamente representados por un diagrama de árbol, destinado a visibilizar los vínculos entre los elementos del árbol y entre los niveles. En el primer nivel, existe la distinción entre factores económicos y de calidad. Factores de calidad se dividen en sub-criterios como el tiempo de entrega, la puntualidad y la falta de cumplimiento. Si bien los factores económicos son fáciles de entender y cuantificar, vale la pena aclarar el significado de los factores de calidad y cómo pueden ser cuantificados. Según la norma ISO 9000 [29], la calidad de un producto se define como "el conjunto de características de un producto/servicio que satisfacen las necesidades explícitas e implícitas de los usuarios y de la sociedad como un todo".

Basándose en esta definición, los criterios más importantes considerados para la selección de una estrategia de suministro pueden clasificarse como sigue:

Coste de producción: esta es la suma de los costes de fabricación y logística para la producción y el envío de una pieza o un ensamblado en el lugar de uso (ej.: consumidor final para un producto final o general para una planta de fabricación de componentes semi-terminados). El examen de los costes logísticos es crucial para la selección del mejor escenario de producción, especialmente cuando se comparan las estrategias de suministro nacional e internacional. Software específico para estimar costes puede ser empleado para el cálculo de los costes de fabricación y logística de cada pieza/producto todavía durante la fase de diseño. A menor coste de producción, mejor será el proveedor;

- **Tiempo de entrega:** este parámetro mide el tiempo promedio que una empresa necesita para obtener los productos solicitados por parte de sus proveedores, en condiciones específicas (por ejemplo, tipo de producto, país, etc.). Este tiempo es una función del medio de transporte utilizado para el transporte y la distancia recorrida. Cuanto más corto sea el tiempo, mejor será el proveedor;
- **Puntualidad:** este parámetro mide el promedio de demoras de una empresa para obtener productos de sus proveedores. Este valor se define como el porcentaje de veces que el tiempo efectivo ha sido mayor que la esperada. La mejor la puntualidad, mejor será el proveedor;

- **Incumplimiento:** Este parámetro indica el número promedio de piezas o productos defectuosos o no conformes, respecto al total de componentes/productos recibidos de sus proveedores. Este parámetro se mide como un porcentaje, para una producción personalizada, o por partes por millón, para una producción en masa. Cuanto menor sea el incumplimiento, el mejor proveedor.

Los criterios de calidad pueden cuantificarse para un producto específico, como se hizo con el coste de producción. Las empresas pueden medir y controlar estos parámetros mediante herramientas de software de gestión de la cadena de suministro integrada con módulos específicos (por ejemplo, adquisición de supervisión del cumplimiento).

El segundo paso del método consiste en seleccionar las posibles alternativas, que son equivalentes a las estrategias de suministro. Por ejemplo, estrategias alternativas de suministro pueden ser: (i) hacer un producto internamente, (ii) comprar un producto de un proveedor local, (iii) comprar un producto a un proveedor nacional, (iv) Comprar un componente a partir de un proveedor extranjero, etc. Para este fin, la selección del proveedor y el mapeo es crucial. Es importante realizar un análisis ABC para clasificar a los proveedores en categorías basadas en la cifra de gasto total durante un período (generalmente, el 10% de los proveedores de productos de mayo hasta el 90% del volumen de negocios de adquisiciones). Los proveedores más importantes serán las que pertenezcan a esta categoría.

El tercer paso del método pretende calcular el vector ponderado de criterios (Cuadro I y el Cuadro II material complementario). Para obtener este resultado, es necesario calcular la matriz de comparaciones de pares, que es una matriz $m \times m$, donde m es el número de criterios utilizados. Los valores dentro de esta matriz significan la importancia del i -ésimo criterio respecto al j -ésimo. Si el peso del i -ésimo es mayor que j -ésimo, significa que el i -ésimo criterio es más importante que el j -ésimo. El vector ponderado de criterios es evaluado en tres fases:

1. Normalización de la matriz: el resultado será una matriz $m \times m$, donde la suma de las entradas en cada columna debe ser uno;
2. Valoración del vector mediante el promedio de las entradas en cada fila.
3. Multiplicación de la matriz de comparaciones a pares con el vector calculado previamente.

Se deben calcular dos vectores de criterios ponderados. El primer vector (W_{OF}) = $\{W_{T_p}, W_{P_p}, W_{nc}\}$, se muestra en la (Tabla I material complementario), permite la comparación de los sub-criterios de calidad (es decir, tiempo de entrega, la puntualidad y el incumplimiento). Los valores L, M y N en la tabla I (material complementario) representa respectivamente la importancia relativa entre los siguientes criterios: tiempo de entrega vs la puntualidad, el tiempo de entrega vs. no-cumplimiento y puntualidad vs. no-cumplimiento.

El segundo vector (W) = $\{W_E, W_Q\}$, mostrado en la tabla II (material complementario), permite comparar el desempeño económico frente a criterios de calidad. El valor F de la tabla II (material complementario) representa la importancia relativa del desarrollo económico frente a criterios de calidad. Las tablas siguientes, a modo de ejemplo, se refieren a tres posibles alternativas $\{A, B, C\}$. Una vez definidos los pesos para cada criterio, durante la cuarta etapa, el decisor debe establecer las puntuaciones para cada solución alternativa y para todos los criterios (Tabla 1).

Tales calificaciones pueden calcularse utilizando una herramienta de software o bases de datos de la empresa de consultoría.

A continuación, se generan las *matrices de comparación por pares* (Tabla 2 y Tabla 3). Estas matrices son matrices $n \times n$, donde n es el número de alternativas. Para el sub-criterio *puntualidad*, la puntuación de la i -ésima alternativa comparada con la j -ésima alternativa se obtiene dividiendo la puntualidad de la i -ésima alternativa respecto la puntualidad de la j -ésima. De esta manera, a mayor puntualidad de i comparada con j , mayor será la puntuación de rendimiento relativo. Para los criterios *económicos*, *tiempo de entrega* y *no-cumplimiento*, el método para el establecimiento de las puntuaciones es la opuesta. De hecho, la puntuación de la i -ésima alternativa comparada con la j -ésima alternativa se obtiene dividiendo el valor del parámetro de la j -ésima alternativa con la

Criterios de calidad	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Tiempo de entrega	Q	S	L
Puntualidad	K%	W%	P%
Incumplimiento	V%	R%	T%
Coste de producción	X	Y	Z

Tabla 1: Matriz de puntuaciones para las alternativas disponibles

correspondiente a la i -ésima alternativa. Para el criterio económico, por ejemplo, a menor coste de producción, mejor alternativa.

La clasificación final de las soluciones alternativas (quinta etapa) se realiza en dos fases.

En primer lugar, el tomador de decisiones considera los sub-criterios de calidad. Esta clasificación es posible multiplicando la matriz de comparaciones a pares de sub-criterios de calidad (Tabla 3) por el vector ponderado de calidad (W_{OF}) (Tabla I material complementario). La Tabla 4 presenta las puntuaciones finales $P_a = \{ P_{A,Q}, P_{B,Q}, P_{C,Q} \}$ para las tres alternativas, considerando sólo sub-criterios de calidad.

En segundo lugar, el tomador de decisiones debe ensamblar las puntuaciones económicas con las puntuaciones de calidad para así obtener una clasificación final de las soluciones alternativas (Tabla 5). La puntuación final (P) es evaluado multiplicando la matriz de comparaciones a pares de criterios económicos (P_E) y de calidad (P_Q) (esto es la combinación de la Tabla 2 y la Tabla 4) con el vector ponderado de calidad y de coste de producción (W) (Tabla II material complementario). La mejor solución será aquel con la puntuación más alta.

Para una evaluación de proveedores más robusta, es necesario un análisis de sensibilidad que apoye a la selección de esta mejor

	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C		Puntuación Criterio económico (P_E)
Alternativa A	1	Y/X	Z/X	Proceso de normalización →	$P_{A,E}$
Alternativa B	X/Y	1	Z/Y		$P_{B,E}$
Alternativa C	X/Z	Y/Z	1		$P_{C,E}$

Tabla 2: Matriz de comparación por pares para la puntuación de criterios económicos

	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C		Puntuación Criterios de calidad
Alternativa A	1 1 1	S/Q K/W R/V	L/Q K/P T/V	Proceso de normalización →	$P_{A,t}$ $P_{A,p}$ $P_{A,nc}$
Alternativa B	Q/S W/K V/R	1 1 1	L/S W/P T/R		$P_{B,t}$ $P_{B,p}$ $P_{B,nc}$
Alternativa C	Q/L P/K V/T	S/L P/W R/T	1 1 1		$P_{C,t}$ $P_{C,p}$ $P_{C,nc}$

Tabla 3: Matriz de comparación por pares de sub-criterios de calidad (a la izquierda). Cada celda contiene, alternadamente, la puntuación de tiempo de entrega, la puntualidad y el incumplimiento. Matriz de puntuaciones de alternativas (derecha)

	Puntuación de tiempo de entrega (P_t)	Puntuación de la puntualidad (p_p)	Puntuación de incumplimiento (P_{nc})		Pesos (W_{OF})		Puntuación de los criterios de calidad (P_Q)
Alternativa A	$P_{A,t}$	$P_{A,t}$	$P_{A,nc}$	X	W_t	=	$P_{A,Q}$
Alternativa B	$P_{B,t}$	$P_{B,p}$	$P_{B,nc}$		W_p		$P_{B,Q}$
Alternativa C	$P_{C,t}$	$P_{C,p}$	$P_{C,nc}$		W_{nc}		$P_{C,Q}$

Tabla 4: Matriz de puntuaciones (izquierda) y puntuación final (derecha) de los sub-criterios de calidad

	Puntuación económica (P_E)	Puntuación de calidad (P_Q)		Pesos (W)		Puntuación final (P)
Alternativa A	$P_{A,E}$	$P_{A,Q}$	X	W_E W_Q	=	P_A
Alternativa B	$P_{B,E}$	$P_{B,Q}$				P_B
Alternativa C	$P_{C,E}$	$P_{C,Q}$				P_C

Tabla 5: Matriz de puntuaciones económicas y de calidad, (izquierda) y puntuación final (derecha) de los criterios económicos y de calidad

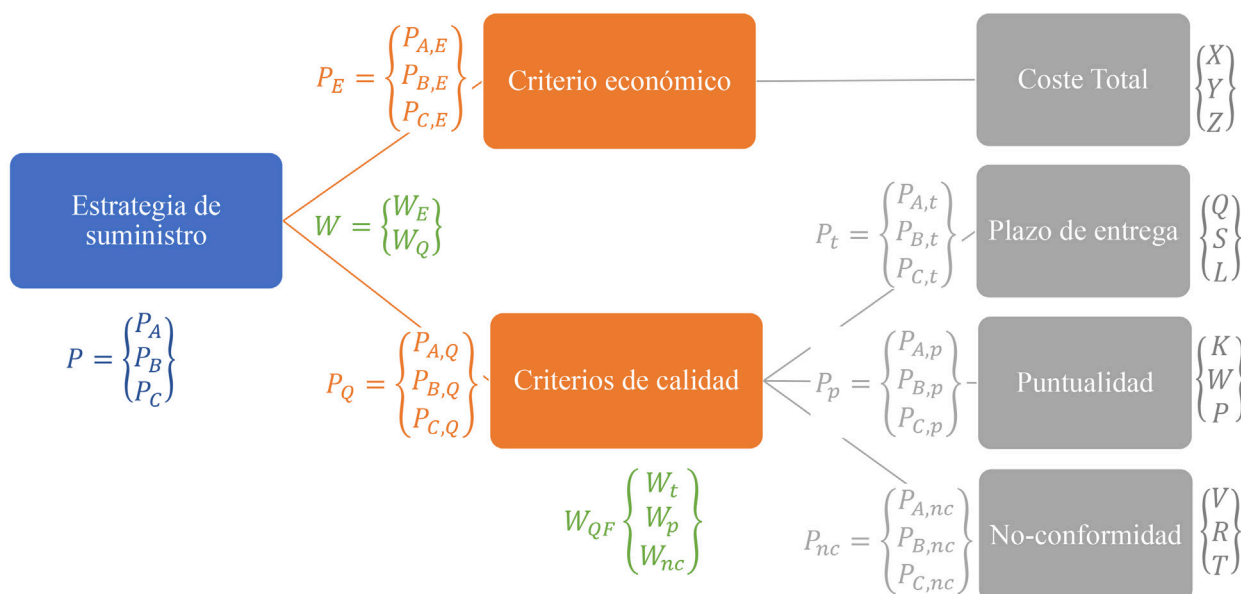


Fig. 1: Criterios de evaluación para la selección de la estrategia de suministro

alternativa (sexto paso). El objetivo del análisis de sensibilidad es estudiar la variación en el resultado del método (es decir: la mejor alternativa) cuando los factores de entrada varían (por ej.: la ponderación de los criterios). Más en detalle, el análisis de sensibilidad permite identificar los rangos dentro de los cuales el peso de los factores económicos y de calidad pueden diferir de manera que la alternativa seleccionada siga siendo la mejor. Por ejemplo, para calcular el rango dentro del cual la alternativa A sigue siendo la mejor, es necesario resolver el siguiente sistema:

$$\begin{cases} P_A > P_B \\ P_A > P_C \\ W_E + W_Q = 1 \end{cases} = \begin{cases} (P_{A,p} \cdot W_p + P_{A,t} \cdot W_t + P_{A,nc} \cdot W_{nc}) \cdot W_Q + P_{A,E} \cdot W_E > (P_{B,p} \cdot W_p + P_{B,t} \cdot W_t + P_{B,nc} \cdot W_{nc}) \cdot W_Q + P_{B,E} \cdot W_E \\ (P_{A,p} \cdot W_p + P_{A,t} \cdot W_t + P_{A,nc} \cdot W_{nc}) \cdot W_Q + P_{A,E} \cdot W_E > (P_{C,p} \cdot W_p + P_{C,t} \cdot W_t + P_{C,nc} \cdot W_{nc}) \cdot W_Q + P_{C,E} \cdot W_E \\ W_E + W_Q = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Donde P_A , P_B y P_C son las puntuaciones finales respectivamente de la alternativa A, B y C.

Un obstáculo fundamental en la aplicación del método AHP

está relacionado con problemas de inconsistencia debido a las comparaciones por parejas. En muchas situaciones, como la que se propone en este trabajo, el valor del índice de consistencia (c_i) puede significativamente superar el umbral aceptable del 10%. El índice de consistencia (c_i) es una media aritmética de los autovalores de una matriz de comparaciones por pares, omitiendo en su cálculo al mayor autovalor. Si la matriz de comparaciones a pares es consistente, entonces $c_i = 0$.

Para obtener una matriz consistente, se requiere corregir los resultados de las comparaciones por parejas. La literatura proporciona varios métodos para reducir la inconsistencia de la matriz de comparaciones a pares [30] [31] [32].

3. CASO DE ESTUDIO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso de estudio se ha analizado un conjunto complejo de una máquina herramienta. Este es un sistema estructural compuesto por distintos elementos: (1) una pieza mecanizada, y (2) un conjunto fabricado (Fig. II material complementario). El módulo está diseñado y montado por una empresa italiana, mientras que

	Proveedor A Locales	Proveedor B Nacional	Proveedor C Europa	Proveedor D Lejano Oriente
Materia prima [EUR]	300.00	300.00	300.00	300.00
Fabricación [EUR]	700.00	800.00	400.00	200.00
Transporte [EUR]	80.00	150.00	250.00	180.00
Arancel [EUR]	0.00	0.00	0.00	100.00
Coste de producción [EUR]	1080.00	1250.00	950.00	780.00
Tiempo de entrega [horas]	8	24	35	1000
Puntualidad [%]	92	95	80	70
Incumplimiento [%]	0.8	0.5	2.0	3.0
Puntuación relativa del Tiempo de entrega (peso 0,14)	0.06	0.02	0.01	0.00
Puntuación relativa de la Puntualidad (peso 0,19)	0.03	0.04	0.03	0.03
Puntuación relativa del Incumplimiento (peso 0,67)	0.14	0.22	0.05	0.04
Puntuación absoluta de los Criterios de calidad (peso 0,67)	0.23	0.27	0.10	0.06
Puntuación absoluta de los Criterios económicos (peso 0,33)	0.07	0.07	0.09	0.11
Puntuación final	0.30	0.34	0.19	0.17

Tabla 6: Resultados del caso de estudio

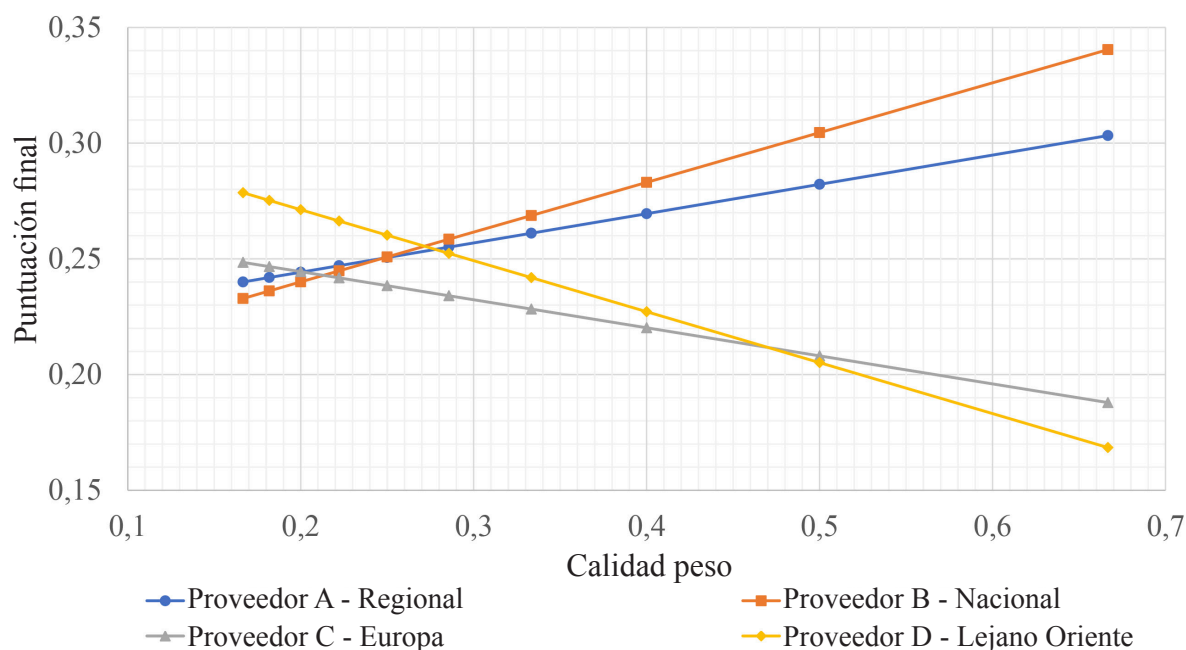


Fig. 2: Puntuación final calidad vs. peso para cada alternativa posible

los componentes son fabricados por diferentes proveedores. Por esta razón, este conjunto puede considerarse un ejemplo completo para la aplicación y validación de la propuesta.

Distintos proveedores han sido analizados para la realización del módulo fabricado en metal, en particular: Proveedor A (regional), Proveedor B (nacional - IT), Proveedor C (Europeo) y proveedor D (Lejano Oriente). Todos estos proveedores han sido seleccionados en base a su capacidad y a la asociación existente con la citada empresa. Para cada estrategia de suministro se han evaluado los criterios (Tabla 6). El coste de producción se ha calculado utilizando la herramienta de software *LeanCOST*® (por *Hyperlean srl*). El tiempo de entrega, puntualidad y el incumplimiento de las normas han sido evaluados por el promedio de los valores de dichos parámetros disponibles desde el sistema de gestión de la cadena de suministros de la empresa.

El análisis de los resultados permite esbozar conclusiones interesantes. Desde el punto de vista económico, el proveedor D (Lejano Oriente) es el mejor (Tabla 6). Esta empresa puede realizar y enviar el producto al coste más bajo. No obstante, teniendo en cuenta también los criterios de calidad (Tabla III material complementario), el resultado puede cambiar drásticamente, como se muestra en la Tabla 6. Usando los pesos indicados en la tabla, el proveedor B (nacional - IT) consiguió el doble de puntuación en comparación con el proveedor D (Lejano Oriente).

La simulación de cómo varía la puntuación total, cambiando el peso relativo de los criterios de calidad, permite al encargado de la toma de decisiones entender el comportamiento de cada alternativa. De acuerdo con la Fig. 2, la puntuación total del proveedor C (Europa) y D (Lejano Oriente) tienen una tendencia negativa, a pesar del aumento del peso de la calidad. Este comportamiento significa que esas alternativas son preferibles sólo cuando los criterios económicos son más importantes que la calidad.

Bajo esta condición, la ventaja debida a un menor coste de producción supera las desventajas relativas a su calidad. El análisis de sensibilidad realizado sobre la calidad y los criterios económicos dice que el proveedor B (nacional - IT) es el mejor mientras que el peso de los criterios de calidad no disminuya por debajo de 0,272. Dado que el peso de los criterios de calidad definido por

el decisor, para este caso de estudio, fue de 0,666, la alternativa seleccionada es lo suficientemente robusta (baja sensibilidad) a posibles cambios en el peso de este criterio.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo ha presentado una versión simplificada del proceso de análisis jerárquico para la evaluación simultánea de factores económicos y de calidad en distintas estrategias de suministro. El objetivo de ese método multi-criterio es apoyar a las empresas para evaluar y comparar diferentes estrategias de suministro durante los primeros procesos de desarrollo de producto. Los criterios seleccionados en el método propuesto se basa en datos cuantitativos disponibles (cálculo directo de recuperación desde los repositorios internos) durante el diseño o reproceso de diseño de un producto. Esta condición hace factible su aprobación durante la fase de diseño. El caso de estudio presenta los resultados alcanzados mediante la adopción del método propuesto en un conjunto funcional fabricado en metal de una máquina herramienta. El análisis de resultados es útil para comprender las ventajas de adoptar un método multi-criterio para la selección de la mejor estrategia de suministro.

La principal limitación del método se basa en el número de criterios de calidad seleccionado. Para seleccionar la mejor estrategia de suministro y proveedores, otros criterios establecidos en el estado del arte [28] y aplicables en la fase de diseño deben ser considerados. Por ejemplo, el nivel de investigación e innovación de un proveedor (su actitud para mejorar e identificar posibles avances tecnológicos) y su *relación con el cliente* (capacidad de un proveedor para establecer una comunicación transparente con el cliente acerca de las tecnologías de fabricación interna) son criterios importantes que se deben considerar al diseñar y desarrollar un producto. De hecho, la capacidad de un proveedor en dar apoyo a un cliente durante las actividades de investigación y desarrollo, es un método para desarrollar productos competitivos.

Un aspecto interesante a abordar como trabajo futuro consiste en la elaboración de una arquitectura de software a través de la cual sea posible desarrollar el presente método. El marco

debe incorporar el diseño asistido por ordenador, la gestión de la cadena de suministro, gestión del ciclo de vida del producto y las herramientas de software de análisis de costes.

REFERENCIAS

- [1] Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, Grote KH. Diseño de ingeniería: un enfoque sistemático. 3ª edición. Londres: Springer-Verlag, 2007 ISBN: 978-1-84628-318-5.
- [2] Ulrich KT, Eppinger SD. Diseño y desarrollo de productos. 5ª edición. Eeuu: McGraw-Hill Educación, 2011 ISBN: 10: 0073404772.
- [3] Favi Mandolini C, M, Germani M. "Desarrollo de estrategias de producción productos complejos y multi-objetivo utilizando un enfoque de diseño conceptual". Revista Internacional de avanzada tecnología de fabricación. 2018. Vol.95-1 p.1281-1291. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1321-y>.
- [4] Favi C, Germani M, Mandolini M. "Diseño para fabricación y ensamblaje vs. diseño para coste: Hacia un enfoque multi-objetivo para estrategias de adopción de decisiones durante el diseño conceptual de productos complejos". CIRP Procedia. 2016, Vol.50 p.275-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.190>.
- [5] Un Cakravastia Takahashi, K. "modelo integrado para la selección de proveedores y la negociación en un entorno a pedido". Revista Internacional de Investigación de Producción. 2004. Vol.42-21 p.4457-4474. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540410001727622>.
- [6] L, Gracia-Villar Dzul-López Gonzalez-Benitez S, M et al. "El uso de los costos de calidad en el diseño de proyectos de construcción metodología (QCDCP): estudio de caso". DYNA. 2010. Vol.85-1 p.47-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/2848>
- [7] Andrade LPCS, Ferreira CV, Ferran L et al., "Desarrollo de la cadena de suministro - Modelo, Oportunidades y Desafíos". Procedia CIRP. 2016, vol.41, p.544-549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.030>.
- [8] Bhutta KS, Huq F. "Problema de selección de proveedor: una comparación del coste total de propiedad y el proceso de jerarquización analítica". La gestión de la cadena de suministro. 2002. Vol.7-3 p.126-135. DOI: <https://doi.org/10.1108/13598540210436586>.
- [9] Un Susuz Kokangul, Z. "jerarca proceso analítico integrado y programación matemática para la selección de proveedores problema con descuento por cantidad". Modelación matemática aplicada. 2009. Vol.33-3 de la Asamblea p.1417-1429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.01.021>.
- [10] Todić V, Lukic D, Milošević M et al. "Manufacturabilidad del diseño del producto con respecto a la idoneidad para la fabricación y montaje (DfMA). Oficial de Ingeniería de Producción. de 2012. Vol.16-1 p.47-50.
- [11] Fattahi M, Govindan K, E. "Keyvanshokooh receptivo y flexible en el diseño de la red de la cadena de suministro y la interrupción riesgos operacionales con plazos de entrega a los clientes sensibles". Transporte parte e investigación: revisión de Logística y Transporte. 2017. Vol.101 p.176-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.02.004>.
- [12] Selviaridis K, Primavera M. "Alineación de la cadena de suministro como proceso: contratación, el aprendizaje y la remuneración basada en el rendimiento". Revista Internacional de Operaciones y gestión de la producción. 2018. Vol.38-3 p.732-755. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2017-0059>.
- [13] R. Slagmulder "Gestión de costes en toda la cadena de suministro". La gestión de costos en las cadenas de suministro. 2002. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-11377-6_5.
- [14] D Fayard, Lorena SL, Leitch RA et al. "Efecto de la gestión de los gastos internos, sistemas de información, y la capacidad de absorción de integración inter-organizacionales en la gestión de costos en las cadenas de suministro". Contabilidad, organizaciones y la sociedad. 2012. Vol.37-3 p.168-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2012.02.001>.
- [15] Cooper R, Yoshikawa T. "Inter-organizacionales de los sistemas de gestión de costes: el caso de la Tokyo-Yokohama-Kamakura cadena de proveedores". Revista Internacional de la economía de la producción. 1994. Vol.37-1 p.51-62. DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0925-5273(94)90007-8).
- [16] Del Caño-Gochi, Bendaña-Jácome R, M, Castro-Rascado Cruz-Lopez A. "multicriterio selección de contratistas de construcción. redes neuronales. DYNA, 2010. Vol.85-1 p.71-84. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3016>.
- [17] Mohd NF, Bader AE, Khurram JS. "La selección de proveedores para una cadena de suministro sostenible: triple bottom line (3BL) y analítica de la red enfoque de proceso". Benchmarking: una revista internacional. 2017. Vol.24-7 p.1956-1976. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2016-0042>.
- [18] Tarafdar Qrunfleh S, M. "estrategia de sistemas de información de la cadena de suministro: el impacto sobre el rendimiento de la cadena de suministro

y el rendimiento de las empresas". Revista Internacional de la economía de la producción. 2014. Vol.147-B, p.340-350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.09.018>.

- [19] Velasquez M, Hester PT. Multi-Criteria "un análisis de los métodos de toma de decisiones". Revista Internacional de Investigación de Operaciones. 2013. Vol.10-2 p.56-66.
- [20] Dweiri F, Kumar S, Khan SA, Jain V. "Diseño de un sistema integrado de AHP basada Sistema de apoyo para la toma de decisiones para la selección de proveedores en la industria automotriz". Sistemas Expertos de aplicaciones. 2016. Vol.62 p.273-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.06.030>.
- [21] Hammami R, S, Hadj-Alouane Frein AB. "Diseño de la cadena de suministro en el contexto de la deslocalización: Importantes características y nuevas tendencias de modelado". Revista Internacional de la economía de la producción. 2008. Vol.113-2 p.641-656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.016>.
- [22] Hammami R, S, Hadj-Alouane Frein AB. "Un modelo táctico-estratégica para el diseño de la cadena de suministro en el contexto de la deslocalización: formulación matemática y un estudio de caso". Revista Internacional de la economía de la producción. 2009. Vol.122-1 p.351-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.06.030>.
- [23] Un Ishizaka, Labib A. "Proceso de jerarquización analítica y elección de expertos: ventajas y limitaciones". O Insight. 2009. Vol.22-4 p.201-220. DOI: <https://doi.org/10.1057/ori.2009.10>.
- [24] Ho C., Carter P.L. " Mediante la planificación de la capacidad del proveedor en la evaluación de proveedores ". Oficial de Compras y Administración de Materiales. 1988. Vol.24-1, p.23-30. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1988.tb00201.x>
- [25] L.M. Ellram. " La decisión de selección de proveedores en asociaciones estratégicas ". Oficial de Compras y Administración de Materiales. 1990. p.8-14. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1990.tb00515.x>
- [26] Choi T.Y., Hartley J.L. " Una exploración de prácticas de selección de proveedores en toda la cadena de suministro ". Oficial de Administración de las operaciones. 1996. Vol.14-4 p.333-343. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(96\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(96)00091-5).
- [27] De Maio, A., Maggiore, E. (Eds.). Por Organizzare innovare. Evoluti clienti-fornitori rapporti. Etaslibri, Milano. 1992.
- [28] Verma R., Pullma M.E. "un análisis del proceso de selección de proveedores". Revista Internacional de Ciencias de la administración. de 1998. Vol.26-6 p.739-750. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(98\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(98)00023-1).
- [29] (ISO 2015). ISO 9001 sistemas de gestión de la Calidad - Requisitos.
- [30] Jarek S. "Extracción de incoherencia en la matriz de comparaciones a pares en el AHP múltiples criterios de toma de decisiones". Varios criterios en la toma de decisiones. de 2016. Vol.11, p.63-76. DOI: 10.22367/mcdm.2016.11.05
- [31] D, Ergu Kou G, Peng y, Shi Y. "un método sencillo para mejorar el coeficiente de consistencia de la matriz de comparación de pares en ANP". Revista Europea de Investigación operativa. 2011. Vol.213-1 p.246-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.03.014>.
- [32] Zeshui X. "un método práctico para mejorar la coherencia de la sentencia Matrix en el AHP". Revista de Ciencias de Sistemas y complejidad. 2004. Vol.17-2 p.169-175.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue posible gracias a la participación del departamento de diseño e ingeniería de la Hyperlean s.r.l. y Eng. Claudia Scoppolini Massini, quienes proporcionaron conocimientos y pericia que ayudaron mucho a las actividades de investigación.

MATERIAL ADICIONAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8891-1.pdf

