

Aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Planificación de la Producción: Un Estudio de la Literatura*

Josefa Mula Bru¹, Raúl Poler Escoto¹, José Pedro García Sabater²

¹ CIGIP (Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad. Escuela Politécnica Superior de Alcoy. Plaza Ferrándiz y Carbonell, 2, 03801 Alcoy (Alicante). fmula@cigip.upv.es, rpoler@cigip.upv.es.

² CIGIP (Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Campus Vera, s/n, 46021 Valencia. jpgarcia@cigip.upv.es

Resumen

El proceso de Planificación de la Producción implica la determinación simultánea de los niveles de producción, inventario y capacidad de una empresa sobre un horizonte de planificación finito con el objetivo de minimizar los costes totales generados por el plan de producción. Muchos de los aspectos del problema de Planificación de la Producción y de los procedimientos de solución utilizados se prestan a ser resueltos mediante el enfoque de la Teoría de los Conjuntos Difusos.

La Teoría de los Conjuntos Difusos se ha utilizado para definir sistemas que son difíciles de definir con precisión. Como metodología, la Teoría de los Conjuntos Difusos incorpora imprecisión y subjetividad en el proceso de formulación y resolución de modelos. Esta teoría representa una herramienta atractiva de ayuda a la investigación de la Planificación de la Producción cuando la dinámica del entorno de producción limita la especificación de los objetivos, restricciones y parámetros del modelo. Este artículo proporciona un estudio de las aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Planificación de la Producción.

Palabras clave: Teoría de los Conjuntos Difusos, Planificación de la Producción, Estudio del Arte, Aplicaciones.

1. Introducción

En los problemas de Planificación de la Producción, las situaciones reales son, frecuentemente, imprecisas o inciertas. Debido a la falta de información, el estado futuro del sistema puede no ser completamente conocido. Este tipo de incertidumbre (de carácter estocástico) se ha gestionado, tradicionalmente, mediante la teoría de la probabilidad y la estadística (Koopman, 1940 y Kolmogoroff, 1950). Bellman y Zadeh (1970) denominan a este tipo de imprecisión como incertidumbre estocástica en contraste con la imprecisión presente en la descripción del significado semántico de los eventos, fenómenos o sentencias, que denomina borrosidad (*fuzziness*). La borrosidad está presente en todas las áreas en las que los criterios humanos, la evaluación y las decisiones son importantes, como es el caso de la Planificación de la Producción. La Planificación de la Producción *fuzzy* permite la vaguedad o imprecisión que puede existir en las previsiones de la demanda del mercado y/o los

*Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) con referencia DPI2002-01755, titulado "Integración de Procesos de Negocio, Gestión del Conocimiento y Herramientas de Ayuda a la Toma de Decisiones en la Cadena de Suministro de PYMEs Industriales (GNOSIS)".

parámetros asociados con la capacidad productiva, los costes del retraso de la demanda o la pérdida de ventas.

En un esfuerzo por obtener un mejor entendimiento del uso de la Teoría de los Conjuntos Difusos en problemas de Planificación de la Producción y para proporcionar una base para investigaciones futuras, se ha realizado un estudio de la literatura existente sobre aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en problemas de Planificación de la Producción.

Este artículo se inicia con una breve introducción a la Teoría de los Conjuntos Difusos. A continuación, se revisan algunas de las aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en áreas diferentes. Finalmente, se analizan diversos enfoques basados en la Teoría de los Conjuntos Difusos aplicados en la Planificación de la Producción.

2. La Teoría de los Conjuntos Difusos

Zadeh (1965) define formalmente un conjunto difuso como sigue:

Definición. Si $X = \{x\}$ es un grupo de objetos (puntos) representados genéricamente por x , entonces un conjunto difuso o *fuzzy set* \tilde{A} en X es un conjunto de pares ordenados:

a) para un conjunto finito $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, el conjunto difuso \tilde{A} se representa por:

$$\tilde{A} = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n \quad (1)$$

b) cuando X no es un conjunto finito, el conjunto difuso \tilde{A} se define como:

$$\tilde{A} = \int_x \mu_A(x)/x \quad (2)$$

Otra definición de un conjunto difuso fue propuesta por Zimmermann (1987):

$$\tilde{A} = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X \quad (3)$$

donde $\mu_A(x)$ se denomina la *función de pertenencia* (o grado de pertenencia) de x en \tilde{A} , y $\mu_A : X \rightarrow M$ es una función de X en un espacio M denominado *espacio de pertenencia*. Cuando M contiene sólo los dos puntos 0 y 1, \tilde{A} no es *fuzzy* y $\mu_A(x)$ es idéntica a la función característica de un conjunto no difuso. $\mu_A(x)$ es una función cuyo rango es un subconjunto de los números reales no negativos y que tiene la propiedad de que el supremo de este conjunto es finito. Así, la presunción básica es que un conjunto difuso \tilde{A} , a pesar de la imprecisión de sus límites, se puede representar con precisión asociándole a cada punto x un número entre dos límites inferior y superior, por ejemplo 0 y 1, que representan su grado de pertenencia en \tilde{A} .

En todos los enfoques de modelado basados en la Teoría de los Conjuntos Difusos, hay que decidir el tipo de función de pertenencia que caracteriza a los números *fuzzy* o los conjuntos difusos que representan la posible incertidumbre presente en el problema modelado. Además hay que decidir el tipo de operador a utilizar para agregar las funciones de pertenencia de las restricciones y/o función objetivo *fuzzy* dependiendo del contexto de aplicación.

En Bellman y Zadeh (1970) y Zimmermann (1996) se describen con detalle los conceptos básicos de los conjuntos difusos (normalidad, soporte, α -nivel, convexidad y concavidad, cardinalidad, igualdad y otros), las operaciones básicas con conjuntos difusos (intersección, unión, complemento, contención y otras), las operaciones algebraicas (suma, diferencia, producto, potencia y otras) y el resto de conceptos que forman la estructura matemática de la Teoría de los Conjuntos Difusos.

La Teoría de los Conjuntos Difusos tiene dos características esenciales (Zimmermann, 1983): a) las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos y sus operaciones juegan un papel crucial, y b) la Teoría de los Conjuntos Difusos es una teoría formal flexible y muy general. Para aplicarse a casos reales, tiene que adaptarse cuidadosamente. Ni el concepto de función de pertenencia, ni el de operador tienen una única interpretación semántica. Las interpretaciones semánticas dependientes del contexto proporcionarán definiciones matemáticas diferentes de funciones de pertenencia y operadores apropiados.

3. Aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos

La Teoría de los Conjuntos Difusos ha sido ampliamente estudiada durante los últimos 30 años. La mayor parte del interés inicial de la Teoría de los Conjuntos Difusos trataba de representar la incertidumbre en los procesos cognitivos humanos (Zadeh, 1965). Con posterioridad, la Teoría de los Conjuntos Difusos se ha venido aplicando exitosamente en muchas áreas diferentes.

La bibliografía de Gaines y Kohout (1977), Kandel y Yager (1979), Kandel (1986) y Kaufmann y Gupta (1988) abarcan la Teoría de los Conjuntos Difusos y sus aplicaciones de forma general. Zimmermann (1983) y Lai y Hwang (1994) revisan la literatura sobre la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Investigación Operativa y en la toma de decisiones multi-objetivo *fuzzy*, respectivamente. Una aplicación de meteorología puede encontrarse en Cao y Chen (1983) o de medicina en Vila y Delgado (1983). Maier y Sherif (1985) revisan la literatura sobre controladores industriales *fuzzy* y proporcionan un índice de aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en doce áreas incluyendo la Toma de Decisiones, Economía, Ingeniería e Investigación Operativa.

Algunos ejemplos de aplicaciones de los conjuntos difusos en problemas de Ingeniería se pueden encontrar en (Blockley, 1979) y Badiru y Arif (1996), donde se desarrolla un sistema experto *fuzzy* para resolver un problema de distribución en planta. En Albino *et al.* (1998) se usa un enfoque *fuzzy* para evaluar las actividades de los vendedores, o en Ping *et al.* (2000) se desarrolla un modelo *fuzzy* de control para operar el sistema de ventilación en un gran túnel de carretera. El concepto de conjuntos difusos también se ha aplicado en diferentes tipos de modelos de decisión en Investigación Operativa (Zimmermann, 2000 y Shi y Liu, 1993).

4. Aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Planificación de la Producción

El Razonamiento Aproximado (*Approximate Reasoning*) para la Planificación de la Producción se puede incorporar en el diseño de un sistema experto a través de reglas lingüísticas “*if-then*”. Rinks (1981, 1982a y 1982b) utiliza 40 reglas condicionales “*if-then*” para desarrollar algoritmos heurísticos *fuzzy* para la planificación agregada. El autor define un conjunto de términos lingüísticos relevantes en la planificación agregada para construir protocolos de gestión (reglas de decisión). El algoritmo adopta funciones de pertenencia discretas de forma

exponencial. La estructura del algoritmo *fuzzy* se aplica al modelo matemático de Holt *et al.* (1955), que es un modelo clásico de Investigación Operativa para la Planificación de la Producción agregada que utiliza datos reales de una fábrica de pinturas. El coste total generado por la solución del algoritmo *fuzzy* propuesto por Rinks para la planificación agregada excede la solución del modelo de Holt *et al.* (1955) en un 5%.

Turksen (1988a y 1988b), basado en el trabajo de Rinks, utiliza funciones de pertenencia continuas (dadas por intervalos) para definir las reglas lingüísticas de producción para la planificación agregada. El coste total generado por la solución del algoritmo *fuzzy* para la planificación agregada excede la solución del modelo de Holt *et al.* (1955) en un 3%. El autor utiliza 27 reglas base en contraste con las 40 reglas originales definidas por Rinks.

Ward *et al.* (1992) desarrollan un controlador de lógica *fuzzy* o FLC (*Fuzzy Logic Controller*) en el lenguaje C basado sobre el modelo de planificación agregada de Rinks. El programa contiene las reglas de decisión de Rinks, las funciones de pertenencia y los datos del modelo de Holt *et al.* (1955). Usando el programa, los autores replican los resultados obtenidos por Rinks. Además, el programa incluye funciones de pertenencia de forma triangular y exponencial y expande las reglas de decisión base. La alteración de las funciones de pertenencia de Rinks incrementa el coste entre un 2 y un 4.5%, mientras que las reglas base aumentadas proporcionan resultados cercanos a los obtenidos por Rinks.

Gen *et al.* (1992) presentan un modelo de programación matemática *fuzzy* para la planificación agregada con múltiples objetivos. Los coeficientes de la función objetivo, los coeficientes tecnológicos y los términos independientes de las restricciones se representan con números *fuzzy* positivos de forma triangular. El modelo utiliza el min-operador para agregar la función objetivo y las restricciones con coeficientes *fuzzy*. Los autores proponen un procedimiento que transforma un modelo de programación lineal multi-objetivo *fuzzy* en un modelo determinista equivalente.

Kacprzyk y Staniewski (1982) abarcan el problema de controlar el inventario en un horizonte de planificación infinito. El sistema de inventario se representa por un sistema *fuzzy*, con los niveles, entradas y salidas del inventario *fuzzy*. Los autores desarrollan un algoritmo que determina la estrategia óptima invariable en el tiempo para determinar la reposición de los niveles de inventario existentes que maximice la función de pertenencia de la decisión.

Park (1987) estudia el modelo del Lote Económico de Pedido o EOQ (*Economic Order Quantity*) desde la perspectiva de la Teoría de los Conjuntos Difusos. Para modelar los costes del pedido y mantenimiento de inventarios se utilizan números *fuzzy* de forma trapezoidal. El autor sugiere reglas para transformar la información *fuzzy* de los costes en entradas precisas para el modelo EOQ.

Lethimäki (1987) selecciona el Programa Maestro de Producción o MPS (*Master Production Scheduling*) que maximiza el nivel de satisfacción *fuzzy* del cliente desde la perspectiva de un problema de decisión con múltiples objetivos. El problema de decisión consiste en decidir cómo adaptar los requerimientos de los clientes para realizar cambios en sus pedidos. El objetivo de maximizar la satisfacción del cliente es ambiguo y se puede modelar usando la Teoría de los Conjuntos Difusos. Se generan un conjunto de MPS's candidatos para abordar los cambios requeridos en los pedidos de los clientes. Las restricciones que limitan la construcción de los MPS's y los objetivos se representan usando funciones de pertenencia. La decisión del mejor MPS está basada sobre una decisión de maximización.

Lee *et al.* (1990) introducen la aplicación de la Teoría de los Conjuntos Difusos al problema del dimensionado del lote en un sistema MRP de una única etapa. Los autores presentan una versión modificada del algoritmo denominado *Part-Period Balancing* (PPB). La incertidumbre de la demanda se modela usando números *fuzzy* triangulares. Posteriormente, Lee *et al.* (1991) amplían su trabajo incluyendo modificaciones *fuzzy* a los algoritmos de *Silver-Meal*, *Wagner-Whitin* y PPB. El funcionamiento de los tres algoritmos de dimensionado del lote se compara basándose en nueve problemas ejemplo. Los autores determinan que el algoritmo PPB podría ser la mejor elección de conjunto.

Inuiguchi *et al.* (1994) comparan los enfoques de programación posibilista, programación flexible y programación por objetivos para resolver un problema de Planificación de la Producción con datos y aspiraciones ambiguas por parte del planificador. En el enfoque de programación posibilista, se adopta como función de pertenencia para la función objetivo imprecisa una función lineal que crece o decrece monótonamente en un intervalo de tolerancia; por otro lado, los datos ambiguos se representan con números *fuzzy* triangulares simétricos. El modelo de programación flexible adopta el enfoque propuesto por Bellman y zadeh (1970) con funciones de pertenencia lineales agregadas usando el min-operador. El modelo de programación por objetivos utiliza variables de desviación cuyos coeficientes en las restricciones se determinan a partir de las extensiones de los intervalos de tolerancia de los objetivos *fuzzy*. La comparación de las tres soluciones sugiere que la programación posibilista refleja mejor las entradas del planificador, enfatizando, por tanto, la importancia de modelar la ambigüedad en los procesos de Planificación de la Producción.

Sommer (1981) utiliza un enfoque de programación dinámica *fuzzy* para resolver un problema real de Planificación de la Producción. Sentencias lingüísticas, tales como “el *stock* debería ser en el mejor de los casos cero al final del horizonte de planificación” y “disminuir la capacidad de producción tan continuamente como sea posible”, describen las aspiraciones *fuzzy* del planificador. La programación dinámica *fuzzy* se usa para determinar los niveles de producción e inventarios óptimos.

Miller *et al.* (1997) desarrollan una formulación de programación lineal para determinar el programa de producción de una empresa envasadora de tomate fresco en Ruskin (Florida). En el envasado de tomate, la existencia de elementos inciertos atribuidos a la percepción humana es bastante común, tales como la cosecha, el ratio de envasado de tomate, la demanda y los costes de la escasez o pérdida de ventas. Estos elementos imprecisos se incluyen en un modelo *fuzzy*, donde tanto la función objetivo como las restricciones *fuzzy* se representan por conjuntos difusos definidos por una función de pertenencia lineal. Se aplican tres tipos de operadores: el min-operador, el operador “*fuzzy and*” y el operador “*and compensatory*”, la combinación lineal convexa del min-operador y el max-operador. De los tres operadores, el de la combinación convexa proporciona en esta investigación resultados superiores a los otros dos operadores aunque las diferencias son relativamente pequeñas. Los autores muestran que el coste medio obtenido por el modelo de programación lineal es aproximadamente 10 veces superior a los costes obtenidos por el modelo *fuzzy*.

Pendharkar (1997) desarrolla un modelo de programación lineal *fuzzy* para evaluar las diferentes alternativas de producción en el contexto de la industria del carbón. El autor argumenta que existen dos medidas *fuzzy* en la industria del carbón, una desde el punto de vista de la empresa explotadora del carbón, y otra desde el punto de vista de las plantas productoras de energía y consumidoras del carbón. Desde el punto de vista de la empresa comercializadora, la medida *fuzzy* es el “nivel aceptable de beneficio”, es decir, a qué nivel de

beneficio debería la empresa considerar el suministro del carbón a la planta térmica. Desde el punto de vista de las plantas energéticas, la medida *fuzzy* es el “nivel aceptable de calidad”, es decir, a qué nivel de calidad del carbón debería la planta de energía comprar el carbón a la empresa. Dada la naturaleza del problema, la empresa de carbón debe maximizar su beneficio y la satisfacción del cliente en términos de niveles aceptables de calidad. Los resultados de la investigación indican que el modelo tiene potencial para resolver problemas de programación de la producción en la industria del carbón.

Petrovic *et al.* (1998 y 1999) describen el modelado y la simulación *fuzzy* de una cadena de suministro en un entorno de incertidumbre. El objetivo es determinar las cantidades a producir y los niveles de *stock* durante un horizonte temporal finito, para un nivel de servicio aceptable y a un coste razonable. Se modelaron dos fuentes de incertidumbre inherentes a la cadena de suministro: la demanda del mercado y el tiempo de suministro externo de materias primas. Las incertidumbres se describen por frases imprecisas y ambiguas que se interpretan y representan por conjuntos difusos y los cálculos están basados en reglas aritméticas *fuzzy*. Posteriormente, Petrovic (2001) presenta una herramienta de simulación, SCSIM, desarrollada para analizar el comportamiento y funcionamiento de la cadena de suministro en presencia de incertidumbre utilizando conjuntos difusos.

Du y Wolfe (2000) proponen un sistema MRP activo en tiempo real sin la limitación de la planificación período a período. El sistema activo MRP utiliza una arquitectura híbrida que incluye una base de datos orientada a objetos, controladores de lógica difusa y redes neuronales. Los controladores de lógica difusa se combinan con la base de datos orientada a objetos como una integración de conocimiento dinámico y conocimiento estático. Las redes neuronales se usan para aprender reglas *fuzzy if-then* y simular funciones de pertenencia *fuzzy*. Las redes neuronales se combinan con controladores de lógica difusa para la clasificación del inventario. El sistema activo MRP revisa dinámicamente los tiempos de entrega de seguridad, los *stocks* de seguridad y los planes y puede especificar las fechas de liberación y vencimiento exactas para cada requerimiento, recepción programada y orden planificada.

Samanta y Al-Araimi (2001) proponen un modelo basado en la lógica difusa para el control del inventario. El modelo considera una revisión periódica del inventario con una cantidad variable de pedido. El módulo de control combina la lógica difusa con un algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Este modelo simula el sistema de ayuda a la toma de decisiones para mantener el inventario del producto final en el nivel deseado considerando las variaciones de la demanda y teniendo en cuenta la dinámica del sistema de producción. El proceso de producción se modela como un sistema dinámico de primer orden con un tiempo de producción representativo constante. La cantidad a producir se decide en función de la diferencia (error) entre el nivel de inventario existente y el deseado.

Wang y Fang (2001) discuten las limitaciones de aplicar las técnicas de la programación matemática clásica para resolver problemas de Planificación de la Producción a medio plazo y proponen un modelo de programación lineal *fuzzy* para resolver el problema de la planificación agregada con múltiples objetivos donde el precio del producto, el coste de la subcontratación, el nivel de la mano de obra, la capacidad de producción y la demanda del mercado se consideran *fuzzy*. Los parámetros *fuzzy* se representan por intervalos de forma trapezoidal.

Hsu y Wang (2001) proponen un modelo de programación posibilista para gestionar los problemas de Planificación de la Producción en entornos de Montaje bajo Pedido. El modelo

propuesto considera ajustes de la previsión, gestión de materiales y actividades de producción. Se considera la ambigüedad en los costes de la función objetivo debida a las fluctuaciones de los precios, la obsolescencia de los materiales y el valor en el tiempo del capital. Los parámetros *fuzzy* se representan por distribuciones de posibilidad de forma triangular. Entonces, se aplica el enfoque de Rommelfanger (1996) para resolver un modelo de programación lineal con coeficientes imprecisos en la función objetivo, Rommelfanger afirma que una función objetivo *fuzzy* se puede interpretar como una demanda multi-objetivo. Los autores sustituyen la función objetivo *fuzzy* por tres funciones deterministas con los siguientes objetivos: minimizar el coste lo máximo posible, maximizar la posibilidad de obtener el coste más bajo y minimizar el riesgo de obtener el coste más alto.

Reynoso *et al.* (2002) presentan un primer enfoque sobre un MRP II basado en la lógica difusa y la Teoría de la Posibilidad para el tratamiento de la incertidumbre y la imprecisión de la demanda. Este enfoque, denominado F-MRP (*Fuzzy*-MRP), diferencia entre demanda incierta e imprecisa y considera ambas. La demanda incierta se refiere a cuando la ocurrencia de la demanda no es segura. Mientras que la demanda imprecisa ocurre cuando no se conoce la cantidad de la demanda con exactitud. Los valores *fuzzy* de la demanda se representan por una distribución de posibilidad de forma trapezoidal. El modelo se formaliza a través del lenguaje de modelado UML.

El problema de la planificación de cultivos agrícolas se ha formulado en la literatura científica como un modelo de programación lineal. Pero, en muchos casos, los coeficientes de beneficio de los productos agrícolas no son valores ciertos debido a la influencia de la climatología, por lo que un modelo con coeficientes constantes no describe el entorno de toma de decisiones apropiadamente. Por ello, Itoh *et al.* (2003) proponen un modelo para la planificación de cultivos agrícolas con valores inciertos, donde los coeficientes de la función objetivo se representan por variables aleatorias y las restricciones se consideran *fuzzy*. Es decir, se considera tanto la aleatoriedad (valores estocásticos de los coeficientes de la función objetivo) como la borrosidad (conjuntos difusos representando las restricciones *fuzzy*). Los conjuntos difusos de las restricciones *fuzzy* se definen por una función de pertenencia lineal y se agregan usando el min-operador.

Mula (2004) proporciona un nuevo modelo de programación lineal, denominado MRPDet, para la Planificación de la Producción a medio plazo en un entorno de fabricación MRP con restricciones de capacidad, multi-producto, multi-nivel y multi-período. Posteriormente, este modelo se transforma en 15 modelos *fuzzy* basados en diferentes enfoques de programación matemática *fuzzy*, donde los coeficientes de coste en la función objetivo, la demanda del mercado, la capacidad requerida y la capacidad disponible pueden considerarse, dependiendo de cada modelo, datos imprecisos y/o ambiguos. Finalmente, los modelos se testan usando datos reales de un fabricante del asientos para automóviles.

La Tabla 1 resume el objetivo y detalles del enfoque de modelado utilizado en los trabajos de investigación revisados para la Planificación de la Producción bajo incertidumbre.

Tabla 1. Enfoques basados en la teoría de los conjuntos difusos para la Planificación de la Producción.

Autor(es) y Año	Objetivo	Detalle del Enfoque
Rinks (1981, 1982a y 1982b)	Planificación de la Producción Agregada	Razonamiento Aproximado usando reglas lingüísticas
Turksen (1988a y 1988b)	Planificación de la Producción Agregada	Razonamiento Aproximado usando reglas lingüísticas
Ward (1982)	Planificación de la Producción Agregada	Razonamiento Aproximado usando reglas lingüísticas y desarrollo de un controlador basado en la Lógica Difusa

Autor(es) y Año	Objetivo	Detalle del Enfoque
Gen <i>et al.</i> (1992)	Planificación de la Producción Agregada	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Multi-Objetivo <i>Fuzzy</i>
Kacprzyk y Staniewski (1982)	Control del inventario	Inventario como un sistema <i>fuzzy</i> bajo control: Algoritmo con una sentencia condicional <i>fuzzy</i> .
Park (1987)	Modelo EOQ <i>Fuzzy</i>	Información modelada con números <i>fuzzy</i> de forma trapezoidal y transformados en entradas precisas
Lethimäki (1987)	Selección del MPS adecuado en un entorno MRP	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Multi-Objetivo <i>Fuzzy</i>
Lee <i>et al.</i> (1990)	Dimensionado del lote en un sistema MRP	Modificación del algoritmo PPB usando números <i>fuzzy</i> triangulares para modelar la incertidumbre de la demanda
Lee <i>et al.</i> (1991)	Dimensionado del lote en un sistema MRP	Modificación de los algoritmos <i>Silver Meal</i> , <i>Wagner-Whitin</i> y PPB usando números <i>fuzzy</i> triangulares para modelar la incertidumbre de la demanda
Inuiguchi <i>et al.</i> (1994)	Planificación de la Producción	Comparación de la Programación Posibilista, la Programación Flexible y la Programación por Objetivos
Sommer (1981)	Planificación de la Producción	Programación Dinámica <i>Fuzzy</i>
Miller <i>et al.</i> (1997)	Planificación de la Producción en una empresa envasadora de tomate fresco	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i>
Pendharkar (1997)	Planificación de la Producción en la industria del carbón	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i>
Petrovic (1998, 1999 y 2001)	Planificación de la Producción en una cadena de suministro en serie	Modelado y simulación basado en operaciones aritméticas <i>fuzzy</i>
Du y Wolfe (2000)	MRP activo en tiempo real	Sistema híbrido que combina una base de datos orientada a objetos, controladores basados en la Lógica Difusa y Redes Neuronales
Samanta y Al-Arami (2001)	Control del inventario	Algoritmo de control PID basado en la Lógica Difusa
Wang y Fang (2001)	Planificación de la Producción Agregada	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i>
Hsu y Fang (2001)	Planificación de la Producción en un entorno de montaje bajo pedido	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i>
Reynoso <i>et al.</i> (2002)	MRP II <i>fuzzy</i>	Modelado y simulación basado en operaciones aritméticas <i>fuzzy</i>
Itoh <i>et al.</i> (2003)	Planificación de la Producción de cultivos agrícolas	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i> combinando coeficientes estocásticos y restricciones <i>fuzzy</i>
Mula (2004)	MRP restringido <i>fuzzy</i>	Programación matemática <i>fuzzy</i> : Programación Lineal <i>Fuzzy</i>

5. Conclusiones

Este artículo se ha iniciado con una breve introducción a la Teoría de los Conjuntos Difusos, destacando las definiciones y conceptos principales que sientan las bases de su estructura formal. Además, se ha aportado un número considerable de referencias bibliográficas referentes a las aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en ámbitos diferentes. Finalmente, se han revisado diversos trabajos de investigación, que se han considerado relevantes, sobre la aplicación de la Teoría de los Conjuntos Difusos en problemas de Planificación de la Producción. La Planificación de la Producción requiere previsiones de la demanda además de otros parámetros, tales como costes de mantenimiento de inventario, reprogramaciones de la demanda, tiempos de procesamiento, etc. La estimación precisa de cada uno de estos parámetros no es siempre fácil.

La Teoría de los Conjuntos Difusos ha sido aplicada en diferentes problemas de Planificación de la Producción y Gestión de Inventarios. Lo apropiado de la contribución de la Teoría de los Conjuntos Difusos a la resolución de problemas de Planificación de la Producción se puede ver estableciendo un paralelismo con su uso en la Investigación Operativa. Así, Zimmerman (1983) indica que la Teoría de los Conjuntos Difusos se puede usar en Investigación Operativa como: a) un lenguaje para modelar apropiadamente problemas y situaciones que contemplen fenómenos o relaciones *fuzzy*, b) una herramienta para analizar tales modelos para comprender mejor las estructuras de problemas y modelos y c) una herramienta algorítmica para obtener procedimientos de solución más estables o rápidos. Obviamente, estas tres nociones son aplicables a la investigación en el marco de los problemas de Planificación de la Producción.

Referencias

- Albino, V., Garavelli, A.C. y Gorgoglione, M. (1998) Fuzzy logic in vendor rating: A comparison between fuzzy logic system and a neural network. *Fuzzy Economic Review*, 3, 2, 25-48.
- Badiru, A. y Arif, A. (1996) Flexpert: Facility layout expert system using fuzzy linguistic relationship codes. *IEEE Transactions*, 28, 4, 295-308.
- Bellman, R. y Zadeh, L.A. (1970) Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17, 141-164.
- Blockley, D.I. (1979) The role of fuzzy sets in civil engineering. *Fuzzy Sets and Systems*, 2, 267-278.
- Cao, H. y Chen, G. (1983) Some applications of fuzzy sets of meteorological forecasting. *Fuzzy Sets and Systems*, 9, 1-12.
- Du, T.C. y Wolfe, P. (2000) Building an active material requirements planning. *International Journal of Production Research*, 38, 2, 241-252.
- Gaines, B.R. y Kohout, L.J. (1977) The fuzzy decade: a bibliography of fuzzy systems and closely related topics. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, 1, 1-68.
- Gen, M. Tsujimura, Y. y Ida, K. (1992) Method for solving multiobjective aggregate production planning problem with fuzzy parameters. *Computers and Industrial Engineering*, 23, 1-4, 117-120.
- Holt, C.C., Modigliani, F. y Simon, H. (1955) A linear decision rule for production and employment scheduling. *Management Science*, 2, 1-30.
- Hsu, H. y Wang, W. (2001) Possibilistic programming in production planning of assemble-to-order environments. *Fuzzy Sets and Systems*, 119, 59-70.
- Inuiguchi, M., Ichihashi, H. y Tanaka, H. (1990) Fuzzy programming: a survey of recent developments. En: R. Slowinski y J. Teghem (Eds.) *Stochastic versus Fuzzy Approaches to Multiobjective Programming under Uncertainty*, Kluwer, Dordrecht, 45-68.
- Itoh, T., Ishii, H. y Nanseki, T. (2003) A model of crop planning under uncertainty in agricultural management. *International Journal of Production Economics*, 81-82, 555-558.
- Kacprzyk, J., y Staniewski, P. (1982) Long-term inventory policy-making through fuzzy decision-making models. *Fuzzy Sets and Systems*, 8, 117-132.
- Kandel, A. (1986) *Fuzzy mathematical techniques with applications*. Addison-Wesley: Reading, ma.
- Kandel, A. y Yager, R. (1979) A 1979 bibliography on fuzzy sets, their applications and related topics. En: *Advances in fuzzy set theory and applications*, Gupta, M.M., Ragade, R.K. y Yager, R.R. (Ed.), North-Holland, Amsterdam, 621-744.
- Kaufmann, A. y Gupta, M.M. (1988) *Fuzzy mathematical models in engineering and management science*. North-Holland, Amsterdam.
- Kolmogoroff, A. (1950) *Foundation of Probability*. New York.
- Koopman, B.O. (1940) The axioms and algebra of intuitive probability. *Ann. Math.*, 41, 269-292.
- Lai, Y.J. y Hwang, C.L. (1994) *Fuzzy multiple objective decision making methods and applications*. Springer-Verlag: Berlin.
- Lee, Y.Y., Kramer, B.A. y Hwang, C.L. (1990) Part-period balancing with uncertainty: a fuzzy sets theory approach. *International Journal of Production Research*, 28, 10, 1771-1778.
- Lee, Y.Y., Kramer, B.A. y Hwang, C.L. (1991) A comparative study of three lot-sizing methods for the case of fuzzy demand. *International Journal of Operations and Production Management*, 11, 7, 72-80.
- Lehtimäki, A.K. (1987) An approach for solving decision problems of master scheduling by utilizing theory of fuzzy sets. *International Journal of Production Research*, 25, 12, 1781-1793.
- Maiers, J. y Sherif, Y.S. (1985) Applications of fuzzy set theory. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15, 1, 175-189.
- Miller, W.A., Leung, L.C., Azhar, T.M. y Sargent, S. (1997) Fuzzy production planning model for fresh tomato packing. *International Journal of Production Economics*, 53, 227-238.
- Mizumoto, M. (1982) Fuzzy sets and their operations. *Inform. Control*, 50, 160-174.
- Mula, J. (2004) *Modelos para la planificación de la producción bajo incertidumbre. Aplicación en una empresa del sector del automóvil*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Park, K.S. (1987) Fuzzy-set theoretic interpretation of economic order quantity. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17, 6, 1082-1084.

- Pendharkar, P.C. (1997) A fuzzy linear programming model for production planning in coal mines. *Computers Operations Research*, 24, 12, 1141-1149.
- Petrovic, D., Roy, R. y Petrovic, R. (1998) Modelling and Simulation of a Supply Chain in an Uncertain Environment. *European Journal of Operational Research*, 109, 2, 299-309.
- Petrovic, D., Roy, R. y Petrovic, R. (1999) Supply chain modelling using fuzzy sets. *International Journal of Production Economics*, 59, 1-3, 443-453.
- Petrovic, D. (2001) Simulation of supply chain behaviour and performance in an uncertain environment. *International Journal of Production Economics*, 71, 1-3, 429-438.
- Ping, H.C., Jiun-Hong, L. y Chin-Teng, L. (1998) Application of fuzzy control to a road tunnel ventilation system. *Fuzzy Sets and Systems*, 100, 1-3, 9-28.
- Reynoso, G., Grabot, B., Geneste, L. y Vérot, S. (2002) "Integration of uncertain and imprecise orders in MRPII", 9th International Multi-Conference on Advanced Computer Systems. Conference on Production System Design, Supply Chain Management & Logistics, Miedzyzdroje, Pologne, October, 23-25.
- Rinks, D.B. (1981) A heuristic approach to aggregate production scheduling using linguistic variables. *Applied Systems and Cybernetics*, vol. VI, Lasker, GE, Pergamon Press: New York, 2877-2883.
- Rinks, D.B. (1982a) The performance of fuzzy algorithm models for aggregate planning under differing cost structures. *Fuzzy Information and Decision Processes*, Gupta, MM, y Sanchez E. North Holland, Amsterdam, 267-278.
- Rinks, D.B. (1982b) A heuristic approach to aggregate planning production scheduling using linguistic variables: methodology and application. *Fuzzy set and possibility theory*, Yager R, Pergamon Press, New York, 562-581.
- Rommelfanger, H. (1996) Fuzzy linear programming and applications. *European Journal of Operations Research*, 92, 512-527.
- Samanta, B. y Al-Araimi, S.A. (2001) An inventory control model using fuzzy logic. *International Journal of Production Economics*, 73, 217-226.
- Shi, Y. y Liu, Y.H. (1993) Fuzzy potential solutions in multicriteria and multiple constraint lever linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 60, 163-179.
- Sommer, G. (1981) Fuzzy inventory scheduling. En: *Applied systems and Cybernetics*, vol VI, G. E. Lasker (Ed.), Academic Press, New York.
- Turksen, I.B. (1988a) Approximate reasoning for production planning. *Fuzzy sets and systems*, 26, 1, 23-37.
- Turksen, I.B. (1988b) An approximate reasoning framework for aggregate production planning, *Computer Integrated Manufacturing, NATO ASI SERIES*, 49, Turksen IB, Springer-Verlag, Berlín, 243-266.
- Vila, M.A. y Delgado, M. (1983) On medical diagnosis using possibility measures. *Fuzzy Sets and Systems*, 10, 211-222.
- Wang, R. y Fang, H. (2001) Aggregate production planning with multiple objectives in a fuzzy environment. *European Journal of Operational Research*, 133, 521-536.
- Ward, T.L., Ralston, P.A.S. y Davis, J.A. (1992) Fuzzy logic control of aggregate production planning. *Computers and Industrial Engineering*, 23, 1-4, 137-140.
- Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets. *Information Control*, 8, 338-353.
- Zimmermann, H.J. (1983) Using fuzzy sets in operational research. *European Journal of Operational Research*, 13, 201-216.
- Zimmermann, H.J. (1996) *Fuzzy Set Theory and its applications*, third edition. Ed. Kluwer Academic Publishers.
- Zimmermann, H.J. (2000) *Fuzzy sets and operations research for decision support*. Beijing Normal University Press.