



## Aplicación de enfoque multicriterio y sistema experto para apoyar una gestión de abastecimiento

### Application of the multicriteria approach and expert system to support supply management

Carlos Torres Navarro <sup>1</sup>

Javier Córdova Neira <sup>2</sup>

#### Resumen

El objetivo de esta investigación es verificar la factibilidad de integración entre las teorías de inventarios y de sistemas expertos a través del diseño de un sistema informático basado en el conocimiento para apoyar el proceso de toma de decisiones en el área de logística y abastecimiento de una empresa forestal líder en Latino América. La metodología utilizada consistió en una revisión de publicaciones científicas de acceso *online* sobre modelos de inventarios, criterios de clasificación multicriterio ABC e identificación de los componentes de sistemas expertos basados en el conocimiento. Los resultados permiten disponer de un diseño de sistema experto soportado por planillas Excel, programación de macros en *Visual Basic* e interacción con un sistema informático de planificación de recursos empresariales. Las principales conclusiones son que es factible la integración entre la teoría de inventarios, la utilización de una clasificación multicriterio ABC con la teoría de sistemas expertos basados en conocimientos de tipo tácito y explícito y además, es posible lograr una reducción del 40% del capital de trabajo retenido en inventarios.

**Palabras clave:** Análisis Multicriterio. Logística y Abastecimiento. Modelos de Inventario. Sistema Experto.

---

<sup>1</sup>Magister en Gestión, Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Depto. de Engenharia Industrial, Av. Collao, 1202. Concepción, Chile. E-mail: [ctorres@ubiobio.cl](mailto:ctorres@ubiobio.cl) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6065-2006>

<sup>2</sup>Licenciado em Ciências de la Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Depto. De Ingeniería Industrial, Av. Collao, 1202. Concepción, Chile. Correo electrónico: [jcordova@alumnos.ubiobio.cl](mailto:jcordova@alumnos.ubiobio.cl) Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7051-9161>

## Abstract

The aim of this research was to verify the feasibility of integration between inventory theories and expert systems theories by designing an information system based on knowledge to support the decision-making process in the logistics and supply area of a leading forestry company in Latin America. The methodology used consisted in a review of scientific publications, accessed online, on inventory models, multi criteria ABC classification criteria, and identification of the components of expert systems based on knowledge. The results permit having an expert system design supported by Excel spreadsheets, macro programming in Visual Basic, and interaction with an information system on entrepreneurial resource planning. The main conclusions indicate that it is feasible to integrate between the theory of inventories, the use of a multi criteria ABC classification with the theory of expert systems based on tacit and explicit type knowledge and, additionally, it is possible to achieve a reduction of 40% of the working capital retained in inventories.

**Keywords:** Expert System. Inventory Models. Logistics and Supply. Multicriteria Analysis.

## Introducción

La función de compras dentro de una organización es la encargada de gestionar de manera oportuna y al menor costo posible los materiales (productos, repuestos e insumos) que se requieren para satisfacer sus necesidades, cumpliendo con los requisitos de precio, calidad, condiciones de entrega y condiciones de pago. Utilizar de forma óptima el capital de trabajo va en beneficio directo de las utilidades que obtenga la organización (DOMÍNGUEZ et al, 2006).

El contexto de esta investigación científico tecnológica se circunscribe en una gerencia de logística y abastecimiento que debe tomar decisiones respecto de la adquisición de alrededor de 12.500 materiales para apoyar los procesos de producción de una empresa de tableros de madera y, que forma parte de una de las mayores empresas forestales de América Latina (ARAUCO, 2014). En la empresa se carece de un método eficaz para determinar los lotes de compra eficientes, porque no se hace distinción entre tipos de materiales, frecuencia y comportamiento de su demanda ocasionando un capital inmovilizado sin justificación

aparente de casi 14 millones de dólares en productos, repuestos e insumos, sin rotación y niveles de reserva redundantes. La gestión de los inventarios cobra relevancia porque se considera como un amortiguador entre los sistemas de oferta y demanda de materiales. El término amortiguador radica en que la cantidad disponible en bodega de cierto material debe soportar las variaciones que puedan experimentar la demanda o los tiempos de entrega en un período determinado influyendo en la rentabilidad, crecimiento y ventaja competitiva de la empresa (AGUILAR, 2009; AGUILAR, 2012).

La revisión bibliográfica ofrece diversos modelos para apoyar la toma de decisiones de inventarios. Sin pretender ser exhaustivo se puede resaltar que según diversos autores siguen estando vigentes los modelos clásicos de lote económico (EOQ), los modelos de revisión continua, periódica y mixta, todos ellos con sus variantes cuando se asume cierta aleatoriedad en la demanda. El modelo EOQ es recomendable para situaciones de alto consumo, frecuencias regulares, fechas de caducidad de largo plazo y demanda uniforme (PÉREZ et al, 2013; GUTIÉRREZ et al, 2013; AGUILAR, 2009).

Por otra parte, los modelos de Wagner-Whitin y de balanceo de período fragmentado son utilizados, según se indica en Bustos y Chacón (2012), para insumos con demanda irregular. El modelo Silver-Meal se utiliza para artículos con demanda sin tendencia y con existencia de variabilidad y el modelo de costo unitario mínimo presenta buenos resultados en escenarios de compra de productos que exhiben una demanda esporádica y cantidades de consumo irregulares (TORRES; RINCÓN, 2005). En Chackelson y Errasti (2010) se destacan las cualidades que ofrece el modelo de inventario base el cual presenta buenos resultados para fines de compra de materiales que muestran un bajo consumo y frecuencia irregular. Finalmente, el modelo Lote a lote ha presentado buenos resultados cuando se aplica a materiales que implican un alto costo de adquisición, con demanda determinística y ambiente justo a tiempo.

En el ámbito de la logística y abastecimiento, llevar un eficiente control de inventarios implica diferenciar la gestión de los mismos dependiendo de las características particulares de los materiales. Es ampliamente conocido el método ABC para la clasificación de inventarios propuesto por Pareto, sin embargo, al ser un método unicriterio dificulta la elección de estrategias diferenciadas que posibiliten una gestión eficiente de los mismos. Cuando un análisis ABC incluye dos o más criterios, este problema es llamado Clasificación ABC Multicriterio el cual es un problema ampliamente estudiado en la literatura. La metodología multicriterio es más flexible que los modelos unicriterio cuando el problema a abordar

requiere considerar mucha información para realizar una buena elección. (CASTRO et al, 2011; CASANOVA, 2011).

En Parada (2009), se concluye que “en la formulación de un enfoque multicriterio la aplicación del método ABC y la matriz costo de adquisición/índice de rotación constituyen dos métodos para clasificar los productos y adoptar estrategias diferenciadas que mejoran la gestión de inventario en las organizaciones.

Una de las variables determinantes en la eficacia de la aplicación de los modelos de inventario es el desafío de identificar criterios para estimar la demanda de l o s productos; en este contexto, en Rivera (2012) se presentan los resultados de la aplicación de modelos de series de tiempo tales como: promedios móviles, suavizamiento exponencial simple, suavizamiento exponencial doble (o método de Holt), suavizamiento exponencial triple (o método de Holt- Winter) y el método de demanda intermitente (o método de Croston).

Por otra parte, los sistemas expertos pertenecen a una rama de la inteligencia artificial basados en conocimiento humano capaces de capturar y representar el conocimiento llevando esta actividad desde un arte a un proceso de ingeniería, de modo que mediante un software permita simular el razonamiento de un experto en un área específica para obtener conclusiones o consejos que guíen el proceso de toma de decisiones. (ALONSO et al, 2011; LIAO, 2005; ESQUIVIAS et al, 2013).

Los componentes fundamentales de un sistema experto son los siguientes: base de conocimiento, base de hechos, componente de explicación, motor de inferencia e interfaz con el usuario. (PINO et al, 2001; TABARES et al, 2013).

En las publicaciones científicas seriadas de acceso online consultadas se reconocen dos tipos de conocimiento que deben incorporarse en un sistema experto, el conocimiento tácito, que es el que proviene de las buenas prácticas, es subjetivo y está en la mente de las personas; y el conocimiento explícito, que se encuentra documentado, es un conocimiento tangible al cual podemos recurrir y consultar cuando sea necesario (ARBONIES; CALZADA, 2004). El conocimiento tácito se rescata del personal involucrado en las compras de materiales quienes reconocen, por su experiencia, qué materiales son más prioritarios que otros, pero muchas veces en un contexto de subjetividad y poca precisión. Entre las técnicas más destacadas para rescatar el conocimiento tácito están las reglas de producción, redes semánticas, mapas conceptuales, mapas mentales y los diagramas de flujo (HENAO; RODRÍGUEZ, 2012). En esta investigación se optará por la regla de producción por su facilidad de comprensión por parte de los encargados de compra. El conocimiento explícito, que complementa al conocimiento tácito, está constituido por la teoría de los modelos de

inventarios y documentos afines que describen prácticas relevantes sobre gestión de inventarios.

El proceso de diseño y desarrollo de un sistema experto requiere que se demuestren evidencias suficientes en relación con la verificación y validación del sistema; estos requisitos proveerán una mayor satisfacción de los usuarios porque proporcionan herramientas y recursos para la realización eficiente del trabajo. Sin embargo, en un sistema experto se debería verificar el cumplimiento de las especificaciones, base de conocimiento y además, incluir criterios de validación. En este contexto, se rescatan los aportes de Hernández (2000), que proporciona la aplicabilidad del estadístico Kappa ( $k$ ) que es una medida de acuerdo entre cada par de expertos, que introduce un ajuste eliminando del porcentaje de acuerdo debido a la casualidad. La expresión de este estadístico se presenta en la ecuación 1.

$$k = (Po - Pc) / (1 - Pc) \in [-1,1] \quad (1)$$

Donde:

$Po$ : proporción de acuerdo observado

$Pc$ : proporción de acuerdo esperado debido a la casualidad

Un valor de + 1.00 de este estadístico indicará un acuerdo total y un valor de 0.00 indicará que el acuerdo se debe por completo a la casualidad. Los valores negativos se obtendrán sólo cuando el acuerdo entre los expertos sea menor incluso que el acuerdo esperado por la casualidad. Los valores mayores a 0.75 indican un nivel de acuerdo excelente; los valores entre 0.40 y 0.75 muestran un acuerdo bastante bueno a bueno, y los valores por debajo de 0.40 indican un acuerdo bastante pobre, más allá del cual, el acuerdo se podría deber simplemente a la casualidad o a una casuística poco representativa.

En resumen, esta investigación tiene como objetivo principal verificar la factibilidad de integración entre las teorías de inventarios y de sistemas expertos a través del diseño de un sistema informático basado en el conocimiento para apoyar el proceso de toma de decisiones en el área de logística y abastecimiento de una empresa forestal líder en el mercadolatinoamericano.

## Metodología

Los principales participantes lo constituyeron los encargados de compra de la unidad bajo análisis quienes poseían la habilidad y conocimiento tácito, tipo de conocimiento que es reconocido como una fuente de competitividad en empresas manufactureras. Las principales etapas que se consideraron para el diseño y desarrollo del sistema experto fueron las siguientes:

- Entrenamiento al personal de adquisiciones para reconocer los dominios de conocimiento teórico y establecer reuniones técnicas para reconocer variables de interés e importancia que tiene cada una en el contexto de la gestión de inventarios (PALMA et al, 2000).
- Aplicación de un cuestionario tipo Likert-Thurstone para calificar las principales variables cualitativas que consideran los encargados de compra dentro de su proceso decisional.
- Utilización de los resultados de Rivera (2012) para realizar estimaciones de consumo a través de series de tiempo para cada uno de los productos sujetos a verificación y validación.
- Análisis de las características de cada material, tales como el registro histórico de consumos, frecuencia de compras durante los últimos doce meses a través de los recursos que aportaba el módulo de materiales del programa de planificación de recursos empresarial de la empresa.
- Revisión y análisis de bases de datos científicas con acceso *online*, tales como SciELO y Dialnet, para rescatar los aportes de la literatura especializada en relación con teorías efectivas de gestión de inventarios y diseño de sistemas expertos.
- Organización de una base de conocimiento tácito y explícito. Este conocimiento fue representado por medio de reglas de producción del tipo “sí condición, entonces acción”. Se optó por este tipo de representación debido a la uniformidad de su estructura y la naturalidad que ofrece para expresar el conocimiento. (BARCELÓ et al, 2009).
- Diseño y validación de un motor de inferencia con el personal involucrado en el proceso de adquisiciones consensuándose la utilización del razonamiento con encadenamiento hacia adelante, donde las variables de entrada determinan el resultado.
- Conformación de una base de hechos con los consumos registrados en el

sistema de planificación de recursos empresariales con un horizonte de antigüedad de doce meses.

Diseño de un componente de explicación a partir de los aportes de la literatura y del conocimiento del personal involucrado en abastecimiento.

Diseño de una interfaz con el usuario compatible con el sistema en uso por los encargados de compra, porque de esta forma se potencia la aplicabilidad del sistema.

La clasificación multicriterio ABC consideró diversas etapas para reconocer la importancia entre los diferentes artículos, las características de variación de los consumos y la identificación de grupos de artículos con consumos homogéneos.

Para reconocer la importancia entre los ítems de inventarios se identificaron cinco factores de interés: a) parámetros de reposición, b) área donde se utiliza un material, c) criticidad de un material, d) frecuencia de consumo últimos 12 meses y e) tiempo entre la emisión de un pedido y su llegada a la planta (tiempo de aprovisionamiento).

Para caracterizar la importancia (o ponderación) de los anteriores factores se consideraron los siguientes atributos: a) clasificación administrativa interna de la empresa para cada factor (individualizándose un total de 35 componentes, distribuidos en cinco factores); b) calificación de la relevancia de cada componente por los encargados de compra utilizando una escala Likert-Thurstone de 1 a 5 (de muy irrelevante a muy relevante). (GUIL, 2005). Lo anterior consideró las propuestas contenidas en Castro et al. (2011), es decir, a través de la ecuación 2, se obtienen los valores normalizados; en la ecuación 3 se obtiene el puntaje total por cada ítem y la ecuación 4 que permite representar el peso asignado al criterio  $j$ .

$$yn_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_{i=1,2,\dots,I} \{y_{ij}\}}{\max_{i=1,2,\dots,I} \{y_{ij}\} - \min_{i=1,2,\dots,I} \{y_{ij}\}} \quad (2)$$

$$PuntajeTotal = \sum_{i=1}^I w_j yn_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J w_j = 1 \quad (4)$$

Donde:

$yn_{ij}$ : valor normalizado del ítem  $i$ -ésimo con respecto al criterio  $j$ -ésimo

Para reconocer y precisar las características de la variación de los consumos de los productos se utilizó como criterio de diferenciación el coeficiente de variación (Cv)

distinguiendo los siguientes tipos de consumos: muy regular ( $Cv < 11\%$ ), regular ( $11\% \leq Cv < 16\%$ ), irregular ( $16\% \leq Cv < 26\%$ ), muy irregular ( $Cv \geq 26\%$ ). (MONTGOMERY, 1996). Estos criterios permitieron mejorar el criterio inicialmente utilizado en la empresa para reconocer diferentes tipos de consumo. La clasificación definitiva de los consumos quedó establecida en ocho tipos de consumo, según se indica en la Tabla 1.

	<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>
A	Alto consumo – Frecuencia regular	-Cantidades consumidas mensualmente son regulares. -Se consume 12 meses en un año.
B	Alto consumo – Frecuencia irregular	-Cantidades consumidas mensualmente son irregulares. -Se consume 12 meses en un año.
C	Consumo regular – Frecuencia regular	-Cantidades consumidas mensualmente son regulares. -Intervalos de consumo son regulares.
D	Consumo irregular – Frecuencia regular	-Se presenta consumo entre 4 y 11 meses dentro de un año. -Cantidades consumidas mensualmente son irregulares. -Intervalos de consumo son regulares. -Se presenta consumo entre 4 y 11 meses dentro de un año.
E	Consumo regular – Frecuencia irregular	-Cantidades consumidas mensualmente son regulares. -Intervalos de consumo son irregulares. -Se presenta consumo entre 4 y 11 meses dentro de un año.
F	Consumo irregular – Frecuencia irregular	-Cantidades consumidas mensualmente son irregulares. -Intervalos de consumo son irregulares. -Se presenta consumo entre 4 y 11 meses dentro de un año.
G	Consumo irregular – Frecuencia puntual	-Se consume 3 o menos meses en un año
H	Consumo irregular – Frecuencia con Devolución	-Presentad evolución de unidades a bodega

**Tabla 1. Clasificación de los consumos**

Los criterios utilizados para determinar qué modelo de inventario utilizar según cada grupo de consumos, fueron de juicio discrecional, tales como:

- grado de cumplimiento de los supuestos de un modelo en particular,
- comportamiento histórico de los consumos durante los últimos 24 meses,
- sugerencias de aplicación de algún modelo según tipos de consumo,
- sugerencias de la alta dirección de la unidad bajo estudio involucrada en la toma de decisiones de compra.
- disponibilidad de información de costos de compra y ordenamiento de los productos,
- capacidades del personal involucrado en los procesos de compra,
- disponibilidad de parámetros en el sistema de planificación de requerimientos de la empresa para utilizar determinados modelos teóricos.

Los modelos que se consideraron en esta investigación para apoyar la toma de decisiones de compra y clasificación multicriterio ABC se indican en la Tabla 2. Para realizar la clasificación estadística y clasificación multicriterio que se presenta en la tabla 3, se tuvieron las siguientes consideraciones: productos que cumplieran los supuestos básicos del modelo EOQ, impacto para la continuidad operacional de la empresa, costos totales mínimos de inventario resultantes según el sistema experto, tasas de consumo y actuación caso a caso.

Clasificación ABC multicriterio				
		A	B	C
Clasificación estadística	A	EOQ con <i>stock</i> de seguridad	EOQbásico	
	B C D E F	El sistema experto selecciona, para estos ámbitos de consumo, el modelo que presente costo mínimo entre los siguientes modelos: Algoritmo Wagner-Whitin (WW), Algoritmo Silver-Meal (SM), Costo Unitario Mínimo (CUM) o Balanceo de Período Fragmentado		
	G	Inventario base	Lote alote	
	H	Sin modelo, se debe analizar puntualmente		

**Tabla 2. Modelos de inventario a utilizar**

Las políticas de inventario establecidas según cada clasificación de productos, aparecen en la Tabla 3. Finalmente, se definieron cuatro conjuntos de reglas de decisión para apoyar el motor de inferencia del sistema experto (Tabla 4).

Clasificación estadística	Clasif. ABC multicriterio	Modelo de inventario	Pronosticar cantidad demandada	Pronóstico intervalos de consumo	Stock de seguridad	Punto de pedido (PP)
A	A	EOQ con SS	Con base en los promedios históricos	Se consumen todo el año	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
A	B o C	EOQbásico	Con base en los promedios históricos	Se consumen todo el año	-	$PP = Ddadiaria * LT$
B	A	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Se consumen todo el año	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
B	B o C	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Se consumen todo el año	-	$PP = Ddadiaria * LT$
C	A	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Demanda promedio	Mantener intervalos consumo	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
C	B o C	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Demanda promedio	Mantener intervalos consumo	-	-
D	A	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
D	B o C	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	-	-

		CUM y BPF	serie de tiempo	serie de tiempo		
E	A	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
E	B o C	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	-	-
F	A	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
F	B o C	Evaluar WW, SM, CUM y BPF	Pronosticar con serie de tiempo	Pronosticar con serie de tiempo	-	-
G	A	Inventariobase	-	-	SS	$PP = Dda\ diaria * LT + SS$
G	B o C	Lote alote	-	-	-	-
H	A;B;C	Analizar devolución	-	-	-	-

**Tabla 3. Políticas de inventario**

Nota: Dda: Demanda; LT: Tiempo de entrega; Z: Coeficiente para nivel de servicio según distribución normal; SS: Stock de seguridad =  $Z * \sigma Dda\ diaria$

	Alcance
1. Reglas para cuantificar variables cualitativas	Conjunto de 28 reglas de decisión para deducir el nivel de importancia que posee cada atributo de clasificación de materiales.
2. Reglas para clasificación ABC multicriterio	Conjunto de tres reglas de decisión para realizar la clasificación ABC multicriterio utilizando el principio de Pareto multicriterio.
3. Reglas para clasificación estadística	Conjunto de ocho reglas de decisión para proveer de un criterio de pronóstico de demanda y modelo de inventario.
4. Reglas para asignar modelo de inventario	Conjunto de quince reglas de decisión para relacionar clasificación de materiales en planta, clasificación multicriterio, punto de ordenamiento y stock de seguridad.

**Tabla 4. Reglas de decisión que conforman el sistema experto**

## Resultados

El resultado de esta investigación lo constituye principalmente el diseño de un sistema experto que integra las orientaciones de la literatura especializada sobre modelos de inventarios con la teoría sobre sistemas expertos basados en el conocimiento. El sistema experto queda conformado por los siguientes componentes: una base de conocimiento, una base de hechos, un componente de explicación, un motor de inferencia y una interfaz con el usuario a través de un sistema informático de planificación de recursos empresariales disponible en el área de logística y abastecimiento de una empresa.

La base de conocimiento se conformó con cuatro tipos de reglas generales: a) para cuantificar variables cualitativas, b) para realizar la clasificación ABC multicriterio, c) para realizar la clasificación estadística y d) para asignar los modelos de inventario según tipos

de consumo. Luego de un proceso de verificación de coherencia de las reglas de decisión, se estableció un total de 34 reglas específicas que conformaron la base de conocimiento.

La base de hechos quedó conformada por los consumos registrados con un horizonte de antigüedad de 12 meses. El sistema fue diseñado para soportar la matriz de consumos de 12.483 materiales que correspondieron al total de registros históricos contenidos en el programa de planificación de recursos empresariales de la empresa. El sistema experto contiene un componente de explicación que permite informar al usuario las razones por las que hace cierta recomendación, este componente es de naturaleza rígida e inalterable frente al usuario.

El motor de inferencia fue configurado con participación de los involucrados en las compras de materiales y el criterio adoptado fue un encadenamiento hacia adelante, de modo que las variables de entrada determinan el resultado sugerido por el sistema experto.

La interfaz del usuario fue integrada por una plataforma de planillas Excel, acompañadas de programación de macros, en Visual Basic, con módulos de acceso general de usuarios y otro módulo con restricción de acceso para actualizar parámetros, base de conocimiento y base de hechos.

El proceso de verificación de la eficacia del sistema experto consideró los siguientes ámbitos:

- Verificación de la incorporación de los conceptos propios asociados con los modelos de inventario y requerimientos de constructo de los sistemas expertos.
- Verificación de la adecuación de la base de conocimiento de modo de comprobar que las reglas de decisión funcionen adecuadamente y además, comprobar que el sistema experto funciona con razonamiento exacto, es decir, que las variables de entrada sean precisas o que no existen variables “difusas” que puedan generar un conflicto al utilizar este tipo de razonamiento.
- Verificación del correcto funcionamiento de la interfaz con el usuario de modo que exista fluidez en la interacción entre el sistema experto y las bases de datos que utilizan los encargados de compra.
- Verificación del grado de protección del sistema de modo de resguardar la base de conocimiento frente a usuarios no autorizados.

Verificación del funcionamiento de los mecanismos de inferencia, el cual fue hecho utilizando un total de 24 artículos ficticios, cada uno de ellos representando una de las posibles combinaciones que es capaz de evaluar el sistema experto. Se utilizaron artículos ficticios para asegurar la evaluación de todos los casos posibles,

comprobando que el sistema generó recomendaciones de forma correcta para los 24 artículos.

– La verificación de la base de conocimiento consistió en análisis de consistencia y completitud. La consistencia para comprobar la coherencia de las reglas de decisión y las condiciones IF innecesarias o redundantes. La completitud estaba enfocada en observar los valores no referenciados, ilegales o atípicos.

Finalmente, la validación del sistema experto se hizo utilizando el estadístico Kappa, que es una medida de acierto entre el sistema y un experto humano. Se optó por esta técnica porque ofrece un rango de interpretación de sus valores, además, ajusta los porcentajes de acierto para eliminar aquellos que son atribuibles a la casualidad, de esta forma la validación se realiza objetivamente. El estadístico Kappa para el área bajo estudio registró un valor de 0.6 indicando que tiene un nivel de acuerdo de bueno a bastante bueno.

Para verificar las prácticas en uso *v/s* las recomendaciones del sistema experto en relación con los parámetros de reposición se analizaron 1.930 artículos, de ellos se observó que 286 deben mantener sus parámetros de reposición actuales, 200 deben subir sus parámetros de reposición y 1.444 artículos debían disminuir sus parámetros de reposición por estar sobre- dimensionados.

El criterio utilizado para identificar los materiales que debían disminuir sus parámetros de reposición fue la cuantificación del capital de trabajo retenido en bodega a través de las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$\Delta PP_i = PP_i - PP_{se_i} \quad (4)$$

$$CR_i = \Delta PP_i \times C_i \quad (5)$$

$$TCR = \sum_{i=0} CR_i \quad (6)$$

Dónde:

$PP_i$  = punto de pedido actual del material  $i$ ;  $PP_{se_i}$  = punto de pedido propuesto por el sistema experto para el material  $i$ ;  $\Delta PP_i$  = Exceso de inventario del material  $i$ ;  $C_i$  = Costo del material  $i$ ;  $CR_i$  = Capital retenido del material  $i$ ;  $TCR$  = Capital de trabajo total retenido en bodega.

El resultado obtenido, indicó que el capital de trabajo retenido en materiales que no tenían rotación era del orden de US\$ 843.000. La magnitud de la estimación anterior se fundamenta en dos causas: por un lado, la realización de órdenes de compra de materiales en

forma arbitraria y sin justificación aparente y por otro lado, la falta de fundamento técnico y teórico para definir los parámetros de reposición de inventarios.

### Discusión

El origen de este estudio surge ante la necesidad de reducir el capital de trabajo retenido en inventarios, reducir los costos totales de inventarios involucrados y mejorar la eficiencia de la unidad de abastecimiento y bodega de una gran empresa elaboradora de tableros de madera.

El problema principal radica en la ausencia de mecanismos efectivos para definir criterios efectivos de gestión de inventario, tamaños de lote económicos de compra, parámetros de reposición, definición de niveles de *stock* adecuados, entre otros.

En la empresa existía un criterio de clasificación ABC para los materiales, pero este no era efectivo porque no integraba en un solo indicador las variables relevantes que caracterizaban a cada material que eran por naturaleza heterogéneos. La experiencia del personal involucrado poseía el conocimiento tácito para distinguir la urgencia de una gestión de compra, pero no poseía la capacidad para realizar una gestión de compra eficiente en relación con tamaños de lote, frecuencia de pedido, nivel de *stock* y modelo de revisión.

La literatura especializada ofrecía diversos enfoques y modelos de inventario aplicados en diversos escenarios, así como modernas estrategias de clasificación ABC, además, ofrecía aplicaciones y metodologías relacionados con el diseño de modelos basados en el conocimiento de modo, sin embargo, no se detectó en la literatura investigada evidencias de una integración entre gestión de compras y sistemas expertos.

La validez de los resultados obtenidos permitió resaltar el rol del personal de compras debido a que aportaron eficazmente su conocimiento tácito para deducir las variables relevantes de cada material y su grado de importancia en la empresa, de esta forma fue posible realizar una clasificación ABC multicriterio eficaz para una gestión de inventarios más oportuna.

El resultado de la utilización del sistema experto permite clasificar los materiales de acuerdo con su real importancia, utilizando el concepto de multicriterio, presenta el resultado de los parámetros óptimos de cada material con base en el comportamiento de sus consumos históricos y entrega una estrategia de compra que ayuda a disminuir los costos totales anuales.

El sistema experto fue validado mediante el estadístico de Kappa, que es una medida

de acierto entre el sistema y un experto humano. Este estadístico arrojó un grado de acierto de bueno a bastante bueno, por lo tanto, las recomendaciones que genera se pueden considerar adecuadas y mejores a las utilizadas inicialmente para atender las necesidades reales de cada material.

Se efectuaron pruebas piloto con 1.930 materiales (utilizando un enfoque de juicio) que tenían definido los criterios de reposición explícitos, obteniendo resultados conformes en términos de identificar aquellos que resultada adecuado mantener sus niveles de reposición, a diferencia de otros en que era más adecuado subir o bajar los niveles de reposición según el tipo de material bajo análisis.

Por otra parte, el sistema experto también ofrece una estrategia diferenciada para estimar el consumo futuro presentando modelos de pronóstico alternativos según se haya comportado la demanda de cada material durante los últimos doce meses (utilización del promedio de consumos cuando se trate de consumos con bajo coeficiente de variación y uso de series de tiempo en caso contrario). Las limitantes que presenta el sistema experto, por una parte, es la no inclusión de restricciones de capacidad para las órdenes de pedido óptimas quedando en manos de los usuarios la decisión cuando se detecte la no factibilidad de almacenar los materiales en las instalaciones disponibles; por otra parte, el criterio establecido para determinar los *stock* de seguridad se debería analizar en investigaciones futuras la opción de tratar la demanda de manera dinámica para mejorar la calidad de esas estimaciones.

El sistema experto fue diseñado para una planta de tableros de madera nacional, el que puede ser replicado en las otras plantas del complejo industrial o incluso en otros tipos de empresas, pues la gestión de inventarios es una importante fuente de competitividad en la industria de manufactura.

Los resultados obtenidos en las pruebas piloto del sistema experto, reafirman que la utilización de una política de lotificación poco rigurosa, produce un *stock* redundante generando costos que se pueden disminuir al conjugar la teoría de inventarios con los recursos que ofrecen los sistemas basados en el conocimiento.

### Conclusiones

La revisión del estudio del arte permite identificar un conjunto de modelos de inventarios que pueden ser utilizados en la toma de decisiones de compra en una empresa de paneles de madera según variabilidad y frecuencia de los consumos. Los modelos utilizados fueron EOQ con *stock* de seguridad, EOQ básico, Wagner-Whitin, Silver-Meal, Costo unitario

mínimo, Balanceo de período fragmentado, Inventario base y Lote a lote.

Es factible integrar la teoría de inventarios con los requisitos que impone el diseño de un sistema experto. El sistema experto propuesto incluye una base de conocimiento participativa, un motor de inferencia conformado por 33 reglas del tipo *If-Then*, una base de hechos soportada a través de un sistema ERP, un componente de explicación conformado por ocho modelos de inventario alternativos para generar políticas de aprovisionamiento de materiales en un contexto de clasificación multicriterio ABC a mínimo costo y una interfaz de usuario utilizando los recursos de Office.

La validación y verificación del sistema experto presenta un grado de acuerdo satisfactorio según los usuarios directos (encargados de compra) debido a que el índice Kappa utilizado para contrastar la respuesta del sistema experto y el criterio tácito de los usuarios, arroja un valor de 0,6.

El sistema experto permite reconocer que de un total de 1.930 artículos analizados, 15% debería mantener sus parámetros de reposición, 10% debería subir sus parámetros de reposición y 75% debe bajar sus parámetros de reposición establecidos.

Los resultados de esta investigación permiten afirmar que con la aplicación de los modelos de inventarios se pueden cambiar los parámetros de reposición existiendo un potencial de reducción del capital de trabajo retenido en inventarios de un 40% y que para efectos de planificar las cargas de trabajo del personal involucrado esta podría abocarse de manera preferente solo al 21,5% de los artículos bajo su ámbito de acción.

### Referencias

- AGUILAR, Gabriel. Gestión de inventarios como factor de competitividad, en el sector metalmeccánico de la región occidental de Venezuela. *Revista de Ciencias Sociales*, 15 (6), 2009. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1315-95182009000300012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1315-95182009000300012&script=sci_arttext) Acceso em: 25/05/2015.
- AGUILAR, Pedro. Un modelo de clasificación de inventarios para incrementar el nivel de servicio al cliente y la rentabilidad de la empresa. *Pensamiento y Gestión*, 32, 2012.
- ALONSO, Amparo et al. *Ingeniería del conocimiento: Aspectos metodológicos*. Madrid, España: Pearson, 2004.
- ARAUCO, S. A. Información corporativa, 2014. Disponible en: [http://www.arauco.cl/informacion.asp?idq=681&parent=631&ca\\_submenu=631&id\\_oma=21](http://www.arauco.cl/informacion.asp?idq=681&parent=631&ca_submenu=631&id_oma=21) Acceso em: 25/05/2015.
- ARBONIES, Ángel; CALZADA, Igor. El poder del conocimiento tácito: por encima del aprendizaje organizacional. *Intangible Capital*, 6, 2004. Disponible en:

<https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2896/1/EI%20poder%20del%20conocimiento%20t%C3%A1cito.pdf> Acceso em: 25/05/2015.

BUSTOS, Carlos; CHACÓN, Galia. Modelos determinísticos de inventarios para demanda independiente. Un estudio en Venezuela. *Contaduría y Administración*, 57, 2012. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39523153011> Acceso em: 25/05/2015.

CASANOVAS, A. Estrategias avanzadas de compras y aprovisionamiento. Barcelona, España: Profit Editorial, 2011.

CASTRO, Carlos et al. Clasificación ABC Multicriterio: tipos de criterios y efectos en la asignación de pesos. *ITECKNE*, 8 (2), 2011. Disponible en: <http://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/iteckne/article/view/407/658> Acceso em: 25/05/2015.

CHACKELSON, Claudia; ERRASTI, Ander. Validación de un sistema experto para mejorar la gestión de inventarios mediante estudio de caso. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 8, 2010. Disponible en: [http://www.um.edu.uy/\\_pload/\\_descarga/web\\_descarga\\_229\\_Validacionsistemaexperto\\_Chackelson\\_Errasti.pdf](http://www.um.edu.uy/_pload/_descarga/web_descarga_229_Validacionsistemaexperto_Chackelson_Errasti.pdf) Acceso em: 25/05/2015.

CUADRADO, Santiago et al. Sistema experto basado en casos para el diagnóstico de la hipertensión arterial. *Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia*, 60, 2011.

DOMÍNGUEZ, Ana Patricia et al. Los modelos de portafolio para el análisis y desarrollo de estrategias de la gestión de compras y aprovisionamiento (Tesis de Grado, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas), 2006. Disponible en: <http://umoar.edu.sv/biblio/tesis/administracion%20de%20empresas/aprovisionamiento/Gestion%20de%20Compras%20y%20Aprovisionamiento%201.06.pdf> Acceso em: 25/05/2015.

ESQUIVIAS, Javier et al. Validación de un sistema experto como ayuda al aprendizaje de la citología cérvicovaginal para formación de citotécnicos. *Revista de la Fundación Educación Médica*, 16 (1), 2013.

GUIL, Manuel. Escala mixta Likert-Thurstone. *Anduli: Revista Andaluza de Ciencias Sociales*, (5), 2005. Disponible en: [file:///C:/Users/carlos%20torres/Downloads/Dialnet-EscalaMIxtaLikertThurstone-2151095%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/carlos%20torres/Downloads/Dialnet-EscalaMIxtaLikertThurstone-2151095%20(1).pdf) Acceso em: 25/05/2015.

GUTIÉRREZ, Eduardo et al. Aplicación de un modelo de inventario con revisión periódica para la fabricación de transformadores de distribución. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV (4), 2013.

HENAO, Mónica; RODRÍGUEZ, Vanesa. Modelo de conocimiento conceptual como apoyo a la Ingeniería del Conocimiento. *Ingeniare*, 20 (3), 2012. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v20n3/art15.pdf> Acceso em: 25/05/2015.

HERNÁNDEZ, Elena. Técnicas de inteligencia artificial e ingeniería del software para un sistema inteligente de monitorización de apneas en sueño (Tesis doctoral, Universidad

- de Acoruña), 2000. Disponible en: [http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/5544/2/HernandezPereira\\_Elena.tesis.pdf](http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/5544/2/HernandezPereira_Elena.tesis.pdf)
- LIAO, Sien. Hsien. Expert system methodologies and applications - A decade review from 1995 to 2004. *Expert System with Applications*, 28 (1), 2005. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417404000934> Acceso em: 25/05/2015.
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Probabilidad y estadística. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, 1996.
- PALMA, J.T. et al. Ingeniería del conocimiento. De la extracción al modelado del conocimiento. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 4 (11), 2000. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92541105>
- PARADA, Oscar. Un enfoque multicriterio para la toma de decisiones en la gestión de inventarios. *Cuadernos de Administración*, 22 (3). 2009. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/205/20511730009.pdf> Acceso em: 25/05/2015.
- PÉREZ, Ileana et al. Un modelo de gestión de inventarios para una empresa de productos alimenticios. *Ingeniería Industrial*, XXXIV (2), 2013. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S181559362013000200011&script=sciarttext> Acceso em: 25/05/2015.
- PINO, Raúl et al. Introducción a la ingeniería artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva. Universidad de Oviedo. ISBN 84-8317-249-6. España, 2001.
- RIVERA, Rubén. Desarrollo de modelo y herramienta para la reposición de stock de bodega de materiales de Panales Arauco S.A. (Tesis de grado). Universidad del Bío-Bío: Concepción, Chile, 2012.
- TABARES, Héctor et al. Modelo de sistema experto para la selección de personal docente universitario. *Tecnológicas*, (30), 2013. Disponible en: <http://itmojs.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/404/458> Acceso em: 25/05/2015.
- TORRES, Dally; RINCÓN, Javier. Modelo de control y manejo de inventarios de repuestos para la aerolínea AIRES S.A. Tesis de grado, Universidad de la Sabana, 2005.

Submetido em: 16.12.2022

Aceito em: 17.01.2023