

INCIDENCIA DE UN MODELO DE EXPERTO Y DE UN SIMULADOR EN LAS DECISIONES SOBRE MATERIALES PARA EL DISEÑO DE MÁQUINAS

INCIDENCE OF A MODEL OF EXPERT AND A SIMULATOR IN THE DECISIONS ON MATERIALS FOR THE DESIGN OF MACHINES

Luis Facundo Maldonado G. Ph. D.
Ómar López Vargas M. Sc. *

RESUMEN

Este artículo resume los resultados de una investigación orientada al estudio de las dimensiones cognitivas de la toma de decisiones en el tema específico de la selección de materiales en diseño mecánico. Se utiliza como escenario experimental un programa de computador para analizar las diferencias en variedad de alternativas que se dan entre sujetos que revisan su propio proceso de toma de decisiones en la solución de un problema y sujetos que revisan la estrategia de un experto que resuelve el mismo problema.

La experimentación se llevó a cabo con diez estudiantes de quinto semestre de la Licenciatura en Diseño Tecnológico de la Universidad Pedagógica Nacional de Bogotá. La recolección de datos se realizó en dos formas: a) registros de expresión verbal de los sujetos que resolvían problemas en voz alta; y b) registros elaborados por el computador de la interacción de los estudiantes con el programa. Como metodología se utilizó el análisis de protocolos de reportes verbales.

Los resultados muestran que el estudio de las estrategias seguidas por un experto lleva a los estudiantes a ajustar su proceso de toma de decisiones a la secuencia seguida por el modelo, con muy pocas alternativas de solución, en contraste con el grupo que revisa su propio proceso, que presenta mayor variedad de soluciones y valoración explícita de las consecuencias de sus decisiones. La simulación del comportamiento del experto actúa como ordenador en el proceso de toma de decisiones de los sujetos del primer grupo, quienes tratan de ajustar su comportamiento al del agente externo, reduciendo, en consecuencia, la búsqueda de alternativas de solución. Los resultados de esta investigación hacen pensar que el estudio del propio proceso de toma de decisiones repercute en mayor autonomía y variedad de soluciones, resultados que son fundamentales para formar la capacidad creativa de un diseñador.

* Profesores - investigadores, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.

Palabras clave: Toma de decisiones, selección de materiales, diseño mecánico, competencias cognitivas, solución de problemas, alternativas de solución, factores de diseño, ambigüedad, ambiente de la tarea, espacio del problema.

ABSTRACT

This research paper addresses the study of cognitive features of decision making process in the scope of material selection within the field of mechanics design. Using as experimental scenario a computer program, it analyzes the differences of alternatives among people who revise their own decision process of solving problem and those who check a strategy followed by an expert solving the same problem.

The experiment was conducted with ten fifth semester undergraduate students of Technological Design at the Universidad Pedagógica Nacional in Bogotá. Two methods of data collection were applied: a) Videotaping of students solving problems talking aloud; and b) Computer records of user interaction with the program. Verbal protocol analysis was used as methodology.

The results show that study of the strategies continued by an expert takes to the students to adjust its process of decisions making to sequence continued by the pattern with very few solution alternatives, in contrast with the revision of the own decision process that consistently produces more variety of solution alternatives and explicit assessment of their decision consequences. The simulation of an expert accomplishments, behaves as organizer of the decision making process and the students try to adjust their own behavior to the expert pattern, diminishing, as a consequence, the alternative solution searching. This research results support the conclusion that the study of the own decision process in the problem solution, generates autonomy and more variety of solution alternatives, results which are very important to develop the creativity skills of a designer.

Key words: Decision taking, material selection, mechanical design, cognitive competence, problems solving, solution alternative, design factors, ambiguity, task environment, Problem spaces.

ANTECEDENTES

Un estado de ambigüedad es una condición previa a la toma de una decisión racional (Russell y Norvig, 1995), y se deriva del nivel de conocimiento incompleto que poseen los sujetos de sus contextos. El co-

nocimiento actual de los sujetos se puede expresar en proposiciones cuyo valor de verdad es conocido (White, 1975), y coexiste con otro conjunto de expresiones de valor de verdad desconocido. Las teorías e investigaciones sobre la toma de decisiones involucran este hecho de alguna forma.

Dunlop (1951) considera cuatro aspectos en la toma de decisiones para resolver un problema: a) vacilación al expresar juicios; b) valoración del conocimiento como incompleto frente al problema específico; c) inversión de un esfuerzo mental en la selección de una alternativa de solución y, d) generación de preferencias¹ frente a las alternativas de solución.

Wald (1954) afirma que existe decisión parcial cuando un área más pequeña de ambigüedades² Q' , está contenida dentro de un área Q más grande, donde ($Q' \subset Q$, figura 1). De otra forma, se desconoce la información pertinente (datos), así como los conocimientos necesarios. Los sujetos pueden acercarse a la solución parcial del problema con algún grado de exactitud.

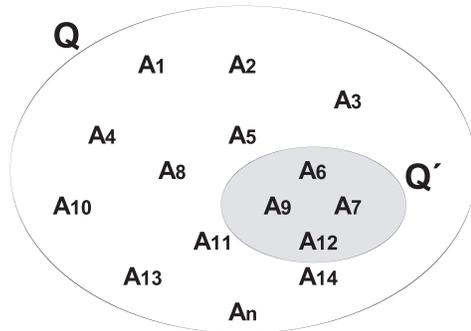


Figura 1. Decisión parcial de un conjunto de alternativas.

Smith (1956) describe el estado de ambigüedad como el punto de partida para tomar una decisión frente a un conjunto de alter-

nativas posibles para resolver un problema. Con base en esto, Rivett (1971) considera la toma de decisiones de acuerdo con el método de investigación operacional. Se basa en lo que denomina “modelo de una ordenación cualitativa de prioridades con base en hechos observables”. Este modelo utiliza en la representación: a) variables del estado actual del problema, pertinentes para quien toma la decisión; b) interdependencia coherente³ de las variables, y c) cuantificación, tanto de las relaciones funcionales como de sus resultados.

White (1975) empleó la expresión “decisión pura” para señalar el conjunto de operaciones cognoscitivas que enlazan el estado de ambigüedad con el acto de selección. De conformidad con esta posición, el problema comienza cuando se reconoce una situación problemática primaria que conduce a problemas secundarios y su solución va acompañada de una mezcla de ambigüedades y procesos cognitivos de selección. Un estado de conocimiento K puede resolver un estado de ambigüedad Q , cuando hay una operación cognitiva θ , tal que:

$$(Q, K) \xrightarrow{\theta} Q' \subset Q$$

Donde Q' sigue un proceso deductivo de (Q, K) vía θ . Es posible que el acto cognitivo genere un subconjunto de ambigüedades Q' contenido en la ambigüedad Q .

Kahneman y Tversky (1984) argumentan que las probabilidades subjetivas aso-

1 La preferencia está relacionada con la elección. Las preferencias de un sujeto por ciertos estados están incorporadas también a una función de utilidad o valor esperado.
2 Ambigüedad es consistente con la selección de un conjunto de alternativas posibles.

3 Coherente = lógica: dos o más cosas que están relacionadas entre sí con algún patrón o modelo. Las cosas coherentes son compatibles; en particular, se habla de coherencia de proposiciones. Coherencia lógica equivale a consistencia.

ciadas a las alternativas de solución de un problema no corresponden a las probabilidades objetivas; en efecto, las decisiones tomadas por los seres humanos responden a diferentes condiciones de utilidad; o, de otra manera, los sujetos toman decisiones bajo grados de incertidumbre⁴ frente a la utilidad de cada alternativa (figura 2).

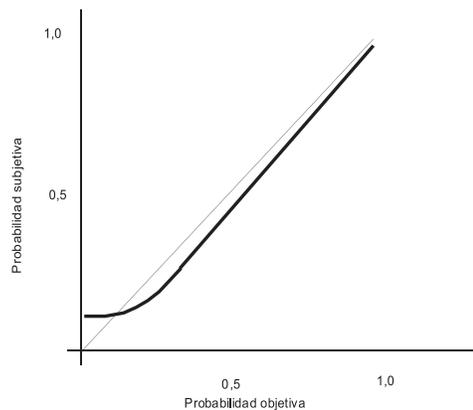


Figura 2. Relación entre probabilidad objetiva y probabilidad subjetiva (Kahneman y Tversky, 1984).

Para tomar decisiones es necesario que los sujetos tengan diferentes preferencias, puesto que la representación y el razonamiento de estas inducen a la utilidad⁵ esperada, concebida por los sujetos como estados de mayor o menor ganancia.

En relación con las condiciones de riesgo, Shafir (1993) expresa que la decisión se toma, no sobre la base de la mejor opción, sino sobre de la alternativa más

viable para sí mismo o para los demás. Shafir tiene en cuenta la curva de utilidades empleada por Kahneman y Tversky, y afirma que, dependiendo del punto en el que los sujetos se ubiquen dentro de esta curva, es más fácil o más difícil la justificación de una acción tomada. La decisión está estrechamente relacionada con la forma de razonamiento que conduce a la selección de una alternativa, de varias posibles, en situación de riesgo.

Howard y Matheson (1984) introdujeron los diagramas de inferencia conocidos hoy en día como redes de decisión, los que, en su forma más general, representan la información que el agente posee cuando se enfrenta a la resolución de un problema. En ella, están incluidos los cambios en las variables que resultarían de tomar una decisión y que se predicen aplicando una función de utilidad para cada una de las alternativas propuestas (figura 3).

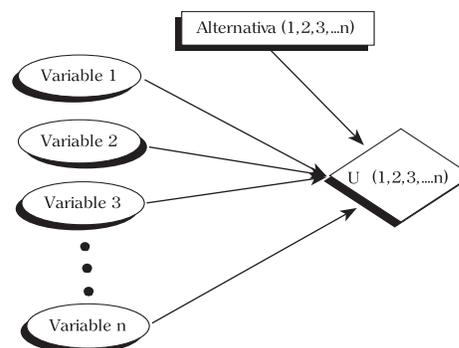


Figura 3. Representación simplificada de una red de decisión (Howard y Matheson, 1984).

Como metodología, estos autores recomiendan los siguientes pasos para tomar una decisión: 1) definir las variables de evidencia pertinentes (estado actual del pro-

4 Utilizamos incertidumbre en términos de no certeza. La incertidumbre es también producto de la información incompleta y de la inexactitud del conocimiento, sobre las características del un problema.
5 Utilidad: es útil todo lo que sirve para satisfacer necesidades humanas, bien sea individuales o colectivas. El tipo de utilidad depende en gran parte del contexto al que se aplique este concepto.

blema), 2) determinar y evaluar la utilidad para cada acción tomada, y 3) seleccionar la acción (alternativa) a la que corresponde la mayor utilidad.

En el caso del diseño de materiales, el agente, una vez cuenta con las evidencias del problema, es decir, datos, reglas, restricciones del diseño respecto a materiales y las proposiciones que constituyen su dominio de conocimiento, acude al cálculo de probabilidad condicional para evaluar la utilidad de las acciones posibles. Cumplido este paso, compara opciones y toma la mejor decisión basado en el criterio del material que más se ajuste a las especificaciones del diseño.

Norvig y Russell (1996) integran la teoría de la probabilidad con la teoría de la utilidad en la toma de decisiones. La primera trata de las preferencias que tienen los agentes racionales por ciertos estados, describiéndolos como axiomas y dando una notación para expresar dichas preferencias a saber: a) ordenación, b) transitividad, c) continuidad, d) monotonicidad, y e) descomposición. La teoría de la utilidad, por su parte, se basa en el concepto de máxima utilidad esperada (MUE).

No siempre es fácil llegar a un modelo matemático (Rivett, 1975), ya que para saber el estado inicial del problema, el agente requiere de percepciones, aprendizaje, representación del conocimiento e inferencias que, de un modo u otro, le permitirán calcular dicha utilidad, que puede ser representada por la siguiente expresión:

$$UE = (A/E) = \sum P(\text{Resultado}, (A)/\text{Hacer}(A), E)$$

Donde:

Resultado (A) representa los diversos productos que se pueden obtener de una acción no determinista A.

Hacer (A) es la proposición de que sea ejecutada la acción A en el estado actual.

E representa la evidencia sobre el mundo que el agente racional tiene.

Para ordenar las preferencias en la toma de decisiones en agentes racionales, Resnik (1998) toma en cuenta las preferencias de los sujetos frente a la selección de alternativas. Usa la expresión "x P y" para indicar que "el agente prefiere escoger x a y" y "x I y" para expresar que "le es indiferente x v y".

En expresión formal:

- 1) Si xPy , entonces no yPx ;
- 2) Si xPy , entonces no xIy ;
- 3) Si xIy , entonces no xPy , y también no yPx ,
- 4) xPy o yPx o xIy , para todos los resultados relevantes x v y ⁶,
- 5) Si xPy y yPz , entonces xPz ;
- 6) Si xPy y xIz , entonces zPy ;
- 7) Si xPy y yIz , entonces xPz , y
- 8) Si xIy y xIz , entonces xIz .

La condición de ordenación se ocupa sólo de las preferencias del agente en el momento presente y muestra que los seres humanos no son capaces de ordenar sus preferencias de manera transitiva (5-8). No obstante, es posible elegir racionalmente

⁶ Nota: La expresión "o" significa "al menos uno y quizás ambos", tal como es costumbre en matemáticas y lógica.

aunque no se satisfagan todas las condiciones de ordenación.

ASPECTOS COGNITIVOS EN LA TOMA DE DECISIONES

En muchas situaciones, dentro del contexto del diseño, se desarrollan procesos de razonamiento no monótono debido a que las situaciones problemáticas son identificadas como débilmente estructuradas por estar basadas en información incompleta.

Minsky (1975) fue el primero que trabajó el razonamiento lógico no monótono y afirma que las herramientas de la lógica formal de primer orden no son suficientes para representar el sentido común, debido a que esta forma de razonamiento involucra un análisis mucho más profundo de la información actual y las conclusiones son inversamente proporcionales a la información de entrada; es decir, a menor información, mayor número de conclusiones.

Con el objetivo de dar respuesta a los interrogantes planteados por Minsky, respecto al razonamiento no monótono, comúnmente conocido como razonamiento por defecto (*default reasoning*), se desarrollaron muchos trabajos formales alrededor de 1980. Dos corrientes de pensamiento se orientaron a estudiar la esencia del razonamiento no monótono, originando una nueva clase de marco lógico. Por una parte, McDermott y Doyle (1980) identifican esta clase de razonamiento con el nombre de "lógica no monótona" (*non-monotonic logic*); por otra parte, Reiter (1980) le denomina "razonamiento por

defecto" (*Default logic, DL*), y usa reglas de inferencia y enunciados de la lógica de primer orden. Los dos enfoques emplean métodos para hacer inferencias de acuerdo con la información disponible y desarrollan constructos nuevos de tipo sintáctico e inferencial.

Israel y Kowalsky (1980) sugieren un elemento o mecanismo adicional, que denominan prueba, para validar esta clase de razonamiento, y argumentan que es necesario probar todos los elementos que intervienen en el proceso antes de formular una conclusión.

McCarthy (1986) parte de un supuesto semejante al del mundo cerrado (CWA, en inglés), según el cual para la resolución de problemas no se requiere nada que no sea explícitamente mencionado en la formulación del mismo. Lo que se intenta es "circunscribir" los datos, reglas, principios, enunciados, etc., intentando de esta forma, reducir un problema complejo que entraña todo tipo de circunstancias improbables e impredecibles a otro más simple, en el que sólo se puedan dar los casos normales.

De acuerdo con este planteamiento, el diseño es reconocido como una actividad cognitiva (Goel & Pirolli, 1992) que se articula con los procesos de razonamiento no monótono. El agente racional toma información incompleta del entorno a través de sus diferentes canales sensoriales; la organiza en estructuras de conocimiento categorial, y la almacena en la memoria de largo plazo (MPL). Estas estructuras son construidas en forma de modelos mentales, creencias, etc., que interactúan

a través de funciones de asociación cerebral con las experiencias previas cuando los sujetos afrontan y toman decisiones sin disponer de toda la información necesaria, pero sí de la requerida, para probar que una acción dada traerá las consecuencias esperadas cuando se aborda el diseño de un elemento mecánico.

Los procesos cognitivos en la toma de decisiones, vistos desde las teorías formalmente desarrolladas y teniendo en cuenta los aspectos específicos del razonamiento no monótono, se encuentran significativamente vinculados y desempeñan un papel central en el estudio actual de la ciencia del conocimiento y de la Inteligencia Artificial, IA.

LOS MATERIALES Y EL DISEÑO MECÁNICO

La selección de los materiales utilizados en ingeniería está ligada a los procesos de manufactura, propiedades de resistencia mecánica y consideraciones económicas, entre otras; estas categorías relevantes se tienen en cuenta en la toma de decisiones en diseño mecánico.

Según Niemann (1967) en la selección de materiales para el proceso de diseño de elementos de máquinas, se consideran factores como:

1. Exigencias impuestas al elemento mecánico que se diseña en términos de esfuerzo (deformaciones permisibles, rigidez del elemento, desgaste y corrosión, entre otras) y vida útil del mismo. Para este análisis se acude a modelos físico-matemáticos de fatiga o de impacto.

2. Condiciones de fabricación que consideren la configuración del elemento en relación con el material y la fabricación del mismo. Su estudio presupone la selección previa del material que satisfaga las exigencias mecánicas y el procedimiento de fabricación más conveniente.

3. Propiedades del material: para la selección del material es fundamental conocer los diferentes materiales utilizados en ingeniería, así como sus propiedades mecánicas, químicas y demás características que le permitan al diseñador tomar una decisión.

Dobrovolsky, Zablosky y otros (1970) consideran que la selección del material es un momento de responsabilidad durante el proceso de diseño de elementos mecánicos. Esta selección debe efectuarse con pleno conocimiento de las propiedades de los diferentes materiales y de las exigencias tecnológicas que deben reunirse para garantizar las condiciones de trabajo y de fabricación necesarias.

Cuando el diseñador de máquinas se enfrenta a la selección de un material tiene un espectro de posibilidades que considerar. Los materiales de ingeniería se encuentran normalizados y, por tanto, es fácil su consulta. En este sentido, el uso de la información, los conocimientos previos y la experiencia que poseen los sujetos respecto a los materiales, pueden ser articulados para cambiar las propiedades de éstos como resultado de distintos tipos de tratamientos térmicos, químico-térmicos y mecánicos, que están encaminados a mejorar ciertas propiedades mecánicas según las especificaciones del diseño.

Por otro lado, al seleccionar el material para la pieza que se proyecta, se toman en consideración los siguientes aspectos:

1. Condiciones de servicio: existen varios criterios sobre los que se basa normalmente la decisión final. Se tienen que caracterizar las condiciones en que el material prestará el servicio dentro del sistema mecánico. Raras veces un material reúne una combinación ideal de propiedades, por lo que en muchas ocasiones habrá que reducir una en beneficio de otra.
2. Manufactura: el material reunirá las condiciones necesarias en cuanto a su maquinabilidad, hecho que permite emplear el mínimo de trabajo cuando se esté fabricando el elemento mecánico.
3. Viabilidad económica: el material seleccionado, desde el punto de vista del precio total del elemento, debe tener ventajas en cuanto al coste del producto terminado. Es decir, un material puede reunir un conjunto idóneo de propiedades, pero resulta económicamente no viable por su elevado coste, estableciéndose así un inevitable compromiso en la selección de éste debido a que el coste de la pieza terminada incluirá costos de material, producción, almacenamiento y transporte, entre otros (Figura 4).

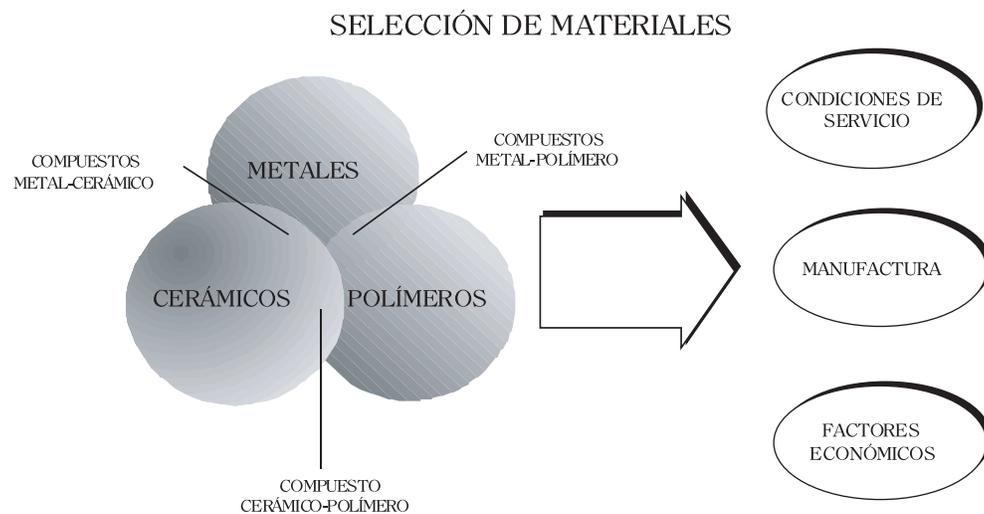


Figura 4. Variables para la selección de materiales (Dobrovolsky V., Zablosky K, y otros, 1970).

Según este enfoque, la decisión de seleccionar un material para el diseño de cualquier pieza mecánica es una tarea compleja. La decisión se dificulta aun más atendiendo a la forma y las dimensiones del elemento, pues estas características influyen tanto en las propiedades de esfuerzos resultantes, como en el método de fabricación.

Hänchen (1976) propone que para el diseño de elementos de máquinas la elección del material se base en los siguientes criterios:

1. Condiciones de funcionamiento de la máquina: es importante tener en cuenta el tipo de exigencias a que está expuesta la pieza, es decir, a qué esfuerzo está sometido el elemento (estática, dinámica o de impacto). Además, han de considerarse las piezas que tienen movimiento de deslizamiento relativo, el número de elementos que conforman el sistema mecánico, la temperatura de funcionamiento y las eventuales acciones corrosivas, entre otras.
2. Los procedimientos de fabricación: bajo qué proceso de manufactura es viable la producción del elemento mecánico (fundición, forjado, soldado, torneado, etc.).
3. El coste de los materiales: con el objeto de que los sistemas mecánicos puedan ser construidos con mayor economía y su precio sea competitivo frente a otras alternativas del mercado.

Hänchen resalta la parte económica del diseño como un mecanismo decisivo de elección, planteando que el diseñador de máquinas debe economizar los mate-

riales, manteniendo siempre la seguridad de funcionamiento necesario del sistema mecánico (Figura 5).

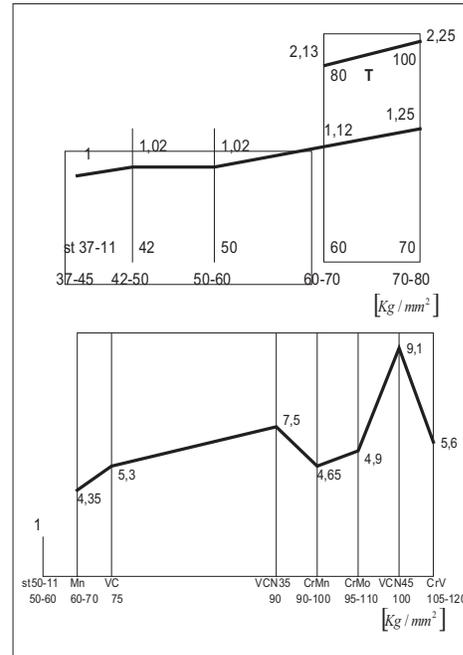


Figura 5. Costos de los aceros aleados y no aleados (Hänchen R., 1976).

En el esquema se comparan los costos de los aceros no aleados según DIN 1611, en donde el precio del st37-11 se toma igual a 1. La figura muestra que el precio de los aceros con resistencia creciente aumenta un poco. Este hecho conduce al empleo de aceros de alta resistencia en vez de los de poca, con lo que, al dimensionar las piezas, se produce un importante ahorro de peso. La figura superior muestra que un tratamiento térmico del acero T aumenta el precio del acero en casi el doble.

En la figura inferior están representados gráficamente los precios de algunos aceros aleados.

Flinn y Trojan (1979), en relación con el problema de la selección, argumentan que ninguno de los materiales cumple con todos estos requisitos; de ahí la dificultad para tomar una decisión, pues, si bien no existe el material ideal, se tiene que seleccionar el que cumpla con el mayor número de especificaciones de diseño.

Shackerfold (1995) parte en sus estudios, de la siguiente pregunta: ¿Qué material se debe seleccionar para determinada aplicación?, argumentando que la selección de materiales es la decisión práctica final. De hecho, plantea que hay que tomar dos decisiones importantes por separado. Primero, el diseñador debe decidirse por el tipo de material más adecuado (metálico, polímero, cerámico, etc.) y luego, en cada categoría, localizar el mejor material, según las especificaciones de resistencia, ductilidad y coste (Figura 6).

Goel y Pirolli (1992) señalan al diseño como una actividad genérica no dependiente del campo disciplinar en el que se desarrolle y lo caracterizan como un problema débilmente estructurado. Reconocen, en este campo, una capacidad creativa, paralela al proceso lógico-formal, que interviene en su implementación y permite establecer la estructura del espacio del problema a partir del modelo de procesamiento de información humana, cuyas características básicas son: 1) descomposición del problema en sub-problemas, 2) evaluación de alternativas en el proceso de solución parcial, 3) retroalimentación, recurriendo a todas las alternativas y teniendo en cuenta tanto las restricciones externas como las internas, 4) empleo de una estructura de control a modo de compromiso, evaluando las alternativas en múltiples contextos, y 5) logro del objetivo (solución final óptima).

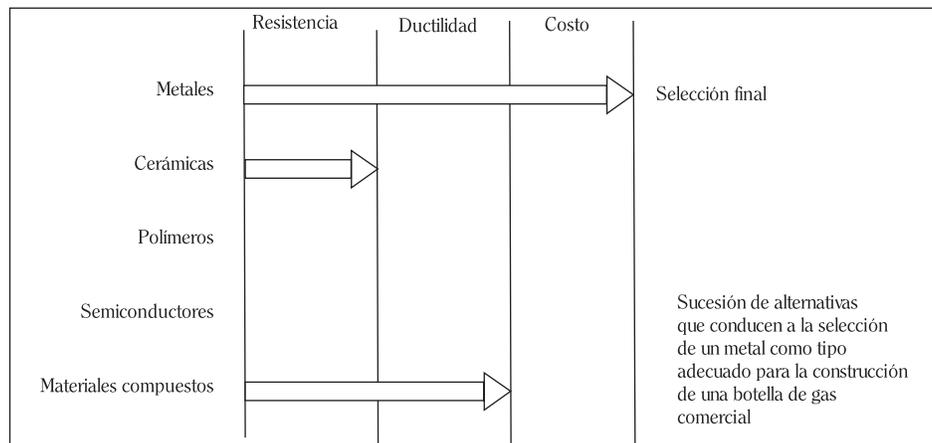


Figura 6. Búsqueda del material más adecuado.

Esta metodología permite concebir el diseño como una actividad representacional, en la que se conjugan la creatividad, la experiencia, los conocimientos previos y la disposición del diseñador para enfrentar problemas. Juegan un papel importante la recuperación de información de la memoria de largo plazo y la inferencia no deductiva. Se entiende la decisión como la elección de una alternativa posible entre varias, dentro de un contexto –tecnológico, socioeconómico, o cultural–. A la decisión precede la valoración de las opciones.

MODELO DE LA INVESTIGACIÓN

MODELO EXPERIMENTAL

El ambiente experimental está constituido por un escenario computacional, en forma de sala de diseño, en donde se desarrolla y gira la experiencia (Figura 7) y los

siguientes laboratorios: a) resistencia de materiales, b) procesos de manufactura y c) almacén. En el ambiente experimental hay una lista de materiales representados en forma de iconos y de manera tal que pueden ser manipulados por el usuario.

La siguiente pregunta de investigación orientó el trabajo: ¿Cuál es el efecto del estudio de un simulador de su propio proceso en la toma de decisiones en diseño mecánico, en comparación con la observación de la ejecución de un experto?

La variable dependiente es el nivel de maximización de la función de utilidad, entendida como el *diseño óptimo de materiales (DOM)*. Este resultado se puede representar por medio de un vector cuyas componentes corresponden a las premisas de Dobrovolsky y otros (1970), es decir, condiciones de servicio, procesos de manufactura y factor económico. La va-

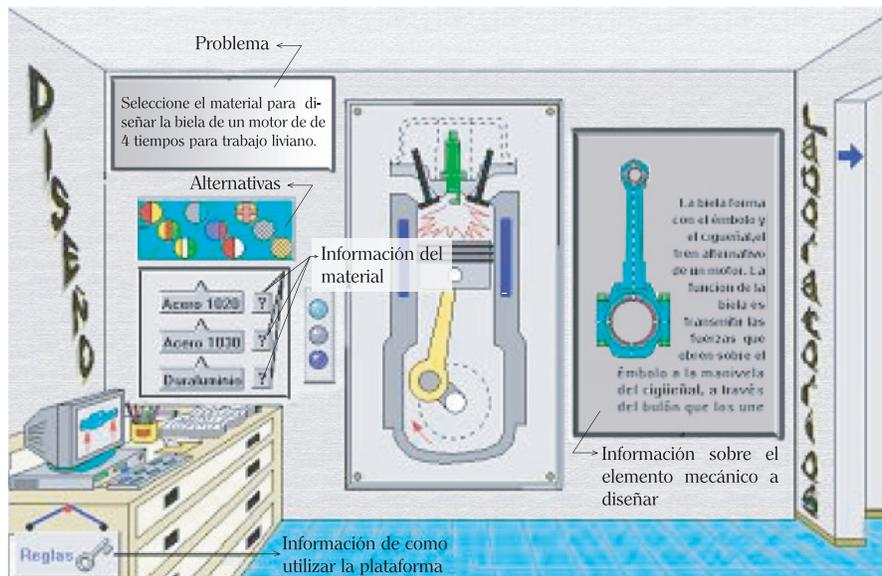


Figura 7. Escenario computacional.

riable dependiente *DOM* está expresada en términos de pesos (K_i), que el sujeto le asigna a cada una de las premisas (Rivett, 1971).

Como variable independiente para la investigación, se considera "la observación en la ejecución de un proceso de solución de un problema". Esta variable tiene dos valores:

Grupo A: observación del comportamiento de un experto tomando una decisión, y

Grupo B: observación de su propio proceso de decisión (sujeto).

La experimentación se considera en tres momentos y guarda la siguiente metodología:

Momento I. A los dos grupos, A y B, se les pide resolver el problema de seleccionar un material para el diseño de un elemento mecánico (intento 1).

Momento II. Los grupos A y B tienen como condición de entrada haber resuelto el problema inicial. Bajo estas condiciones se plantea la siguiente situación:

- Al grupo A se le pide que observe el comportamiento de un experto en la toma de decisiones en diseño mecánico, respecto a materiales, teniendo como base el problema inicialmente planteado a los sujetos.
- Al grupo B se le pide que observe su propio proceso de toma de decisiones del problema anterior (intento 1).

Momento III. A los dos grupos, A y B, se les pide que resuelvan nuevamente el

problema y se toma una medición. Luego, se plantea un nuevo problema con el mismo sistema mecánico, pero con otro elemento, y se toma una segunda medición. Estas dos mediciones permiten la contrastación y comparación de los grupos A y B.

La metodología planteada en los tres momentos se resume en la tabla 1.

Momentos	Descripción
I	Grupo A igual condición que Grupo B (neófitos).
II	Grupo A diferente condición que Grupo B. Grupo A: simulación con un experto. Grupo B: simulación de su propio proceso.
III	Grupo A igual condición que Grupo B.

Tabla 1. Momentos de la investigación.

Registro a través de protocolos verbales

La etapa experimental de esta investigación utiliza análisis de protocolos verbales como metodología para estudiar el proceso de toma de decisiones en la selección de materiales. Se siguió la obra de Ericson y Simón (1993), y la guía metodológica desarrollada por Maldonado (2001). Para registrar la forma como el sujeto resuelve el problema, se utilizó una videgrabadora, durante toda la experimentación. Se tuvieron en cuenta los estudios de Goel y Pirolli (1993) en cuanto al ambiente de la tarea y el espacio del problema en la solución de problemas débilmente estructurados.

Sujetos: fueron seleccionados 10 estudiantes de quinto semestre del proyecto curricular de Licenciatura en Diseño Tecnológico, de la Universidad Pedagógica Nacional. Este trabajo presenta el análisis de cuatro sujetos (dos miran un simulador de su propio proceso en la toma de decisiones y dos miran la observación de la ejecución de un experto).

Transcripción: tomado el registro de los procesos, se procedió a transcribir el contenido de los mismos en forma textual. Como resultado de esta transcripción se tiene un conjunto de expresiones verbales que tienen significado de acuerdo con el proceso que las generó.

Codificación de segmentos: se dividió la transcripción en sentencias o expresiones consideradas como unidades significativas. Para esta investigación no se consideró el tiempo como una variable relevante.

Para el proceso de codificación se utilizaron las siguientes expresiones verbales:

- Expresión comparativa (*HeCo*): es la comparación que un sujeto hace de un estado particular del operando con respecto al estado esperado.
- Hechos, datos (*He*): información dispuesta de manera adecuada en el ambiente experimental para su procesamiento por el agente.
- Relación (*Re*): conexión o enlace entre conceptos del mismo dominio de conocimiento para solucionar un problema particular.
- Evaluación (*Ev*): es la valoración de la relación de un operador con respecto

al cambio en el operando y la evolución del proceso de búsqueda.

- Objetivo (*Obj*): es una meta que se desea alcanzar.
- Hipótesis (*Hi*): es un supuesto inicial, que sin haber sido demostrado, aún se utiliza para explicar hechos observados.
- Expresión metacognitiva (*HeMe*): declaración que un agente hace de algo que entiende como producto del conocimiento del sujeto.
- Valoración de conocimiento (*VaCo*): Reconocer relaciones a partir de la aplicación de operadores en el proceso de solución del problema.
- Hipótesis metacognitiva (*HiMe*): es un proceso de valoración que un sujeto hace de una hipótesis promulgada y del conocimiento adquirido por el sujeto.
- Decisión (*De*): acción final de seleccionar una alternativa de solución.

Las tablas 2, 3 y 4, muestran un ejemplo de codificación de segmentos de un sujeto de cada grupo (A y B) resolviendo el problema de selección de materiales para el diseño de un elemento mecánico.

Momento I

Problema: seleccionar el material para construir la biela de un motor a gasolina. Para lograrlo se debe seleccionar el material óptimo.

Sujeto grupo A	Sujeto grupo B
<p>8. Obj: entonces voy a reglas.</p> <p>12. Obj: voy a mirar escoger materiales.</p> <p>14. He: para seleccionar un material, haga click en el ícono que lo identifica en la lista de materiales. Tiene la oportunidad de seleccionar hasta tres materiales diferentes. Para seleccionar nuevamente materiales diferentes, oprima este botón.</p> <p>7. Obj: Voy a mirar información técnica.</p> <ul style="list-style-type: none"> • • • <p>24. Obj: voy a variables del material.</p> <p>26. He: las variables que se manejan en diseño mecánico respecto a materiales son las tres que se indican. La viabilidad se refiere a la posibilidad potencial en cada una de las mismas.</p> <p>28. He: las variables que se manejan en diseño mecánico respecto a materiales son las tres que se indican. La viabilidad se refiere a la posibilidad potencial en cada una de las mismas.</p> <p>34. He: para obtener información del elemento mecánico o diseñar, dispone de tres laboratorios. Haga click en la flecha que indica laboratorios.</p> <p>37. Obj: voy a decisión.</p> <ul style="list-style-type: none"> • • • <p>84. He: cada acero tiene diferente curva.</p> <p>86. Obj: me salgo.</p> <p>88. Obj: voy a mirar procesos de manufactura.</p> <p>90. He: la manufactura de la biela se hace mediante el proceso de forjado, el material es calentado hasta la temperatura de forja y mediante datos se le da la forma final.</p> <p>91. He: es el proceso de forjado.</p> <p>92. Obj: bueno, ahora voy al laboratorio de resistencia de materiales.</p>	<p>10. HiMe: aquí aparecen varios códigos, que serían diferentes materiales que voy a utilizar.</p> <p>11. Obj: voy a ver las reglas.</p> <p>14. Obj: me dirijo al juego porque no sé de qué se trata.</p> <p>17. Obj: selecciono el material.</p> <p>22. Obj: voy a leer el problema.</p> <p>25. Obj: voy a los laboratorios.</p> <p>31. Obj: voy a entrar al laboratorio de manufactura.</p> <p>38. Obj: voy a entrar al almacén.</p> <ul style="list-style-type: none"> • • • <p>55. Obj: voy a la sala de diseño.</p> <p>57. Obj: se trata de seleccionar el material para la biela.</p> <p>59. HeMe: el acero más conocido para mí es el acero SAE 1045.</p> <p>62. He: el acero SAE 1045 es un acero de resistencia media. Puede ser tratado térmicamente por temple convencional en aceite, obteniéndose una dureza superficial de 55-58 HRC. Forja satisfactoriamente y puede ser soldado.</p> <p>64.VaCo: propiedades mecánicas del acero SAE 1045 son: resistencia a la tracción 70 Kg/mm²; límite elástico 34 kg/mm²; Alargamiento 14-18 %, y temperatura de forja 850- 1.100 grados centígrados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • • • <p>192. HeMe: estas características me sirven.</p> <p>197. HeMe: el factor económico estaba cerca del acero SAE 1010, pero no cumple esta condición.</p> <p>200. Obj: voy a probar con otro material.</p> <p>205. He: el acero 8620 es aleado de media templabilidad, buena resistencia al desgaste por fricción, cementado con núcleo tenaz. Es aconsejable un recocido de estabilización antes de cementar.</p>

Continúa

Continuación

<p>94. Re: condiciones de servicio: la biela se encuentra sometida a esfuerzos de compresión alternantes, por tanto se encuentra trabajando a fatiga, también, por efecto de la explosión de la mezcla combustible, está sometida a esfuerzos de choque.</p> <p>95. Obj: me devuelvo a diseño.</p> <p>98. Obj: el problema consiste en seleccionar el material para diseñar la biela de un motor a gasolina. Para lograrlo se debe seleccionar el material óptimo.</p> <p>101. He: bueno, ya escogí el material.</p> <p>114. De: ahora lo voy a seleccionar acero SAE 8620.</p> <p>118. De: voy a confirmar mi decisión.</p>	<p>208. Ev: voy a mirar el acero SAE 8620.</p> <p>210. Obj: voy a probar con todos los otros materiales que no he probado.</p> <p>219. HeCo: el bronce 68 A No cumple con los factores de diseño.</p> <p>220. HiMe: está entre el acero SAE 1020 y el acero SAE 1030.</p> <p>225. Ev: voy a mirar el acero SAE 1030.</p> <p>229. Ev: voy a mirar el acero SAE 1045.</p> <p>233. De: el acero SAE 1045 esta mayor que el SAE 1020 y el SAE 1030 en las condiciones de servicio. Luego selecciono este material para la biela.</p>
--	--

Tabla 2. Codificación de segmentos, Momento I de la experimentación.

Momento II

Problema: seleccionar nuevamente el material para construir la biela de un motor a gasolina. Para lograrlo, se debe seleccionar el material óptimo (el sujeto del grupo B selecciona nuevamente el material después de observar el proceso que siguió en el momento I. El sujeto del grupo A cambia de decisión cuando observa al agente externo).

Sujeto grupo A	Sujeto grupo B
<p>149. Obj: miro el problema.</p> <p>151. Obj: el problema consiste en seleccionar el material para construir la biela de un motor a gasolina. Para lograrlo se debe seleccionar el material óptimo.</p> <p>152. Obj: voy a mira las reglas.</p> <p>154. Obj: voy a mirar cada una de estas partes.</p> <p>155. Obj: escoger material.</p> <p>156. HeMe: bueno, ya había visto esto.</p> <p>157. Obj: información técnica.</p> <p>159. Obj: cómo ubicar el material.</p> <p>160. HeMe: ya sé, que lo arrastre.</p> <p>161. Obj: Variables del material.</p> <p>162. HeMe: entonces, dependiendo de estas variables, selecciona el material.</p> <p>163. Obj: información del elemento mecánico y decisión.</p> <p>164. Obj: entonces me voy otra vez al juego.</p> <p>166. Obj: me voy para los laboratorios.</p> <p>168. Obj: hago click en la capa de resistencia de materiales.</p>	<p>107. Obj: empiezo nuevamente a seleccionar materiales.</p> <p>108. Obj: entonces trato de utilizar los materiales que no utilicé anteriormente.</p> <p>111. Obj: selecciono el acero SAE 1030.</p> <p>112. Obj: selecciono el acero SAE 1020.</p> <p>113. Obj: selecciono el acero SAE 410.</p> <p>116. HeCo: el acero SAE 1030 presenta un factor económico y procesos de manufactura aceptables, pero presenta menos condiciones de servicio que el que había escogido anteriormente.</p> <p>117. Ev: entonces miro el acero SAE 1020.</p> <p>119. HeMe: bueno, igual, ya vuelvo a decidir por el acero 1045.</p> <p>123. De: el acero SAE 1045 es el que más viabilidad me da.</p>

Continúa

Continuación

<p>169. He: está a compresión fatiga y choque la biela. 170. Obj: ahora voy al laboratorio de manufactura. 173. HeMe: ya sé el forjado y cómo se le da la forma final a la biela. 174. He: aquí sale la biela. 175. Obj: ahora me voy al almacén. 178. He: aquí miro el material. 179. He: este es el costo. 181. Obj: miro el acero SAE 8620 y el acero SAE 1045. 182. Obj: voy al laboratorio de diseño. 185. De: selecciono el material SAE 1045.</p>	
---	--

Tabla 3. Codificación de segmentos, Momento II de la experimentación.

Momento III

Problema: seleccionar el material para construir la válvula de admisión de un motor a gasolina. Para lograrlo se debe seleccionar el material óptimo.

Sujeto grupo A	Sujeto grupo B
<p>195. Obj: el problema consiste en seleccionar el material para construir la válvula de admisión de un motor a gasolina. Para lograrlo se debe seleccionar el material óptimo. 196. Obj: entonces miro la válvula. 198. He: acá está la biela, las camisas, la bujía. 199. VaCo: la válvula de admisión, su misión está en la distribución de los gases. La válvula de admisión permite el ingreso de combustible fresco, mientras que la válvula de escape permite la salida de los gases quemados, su forma ofrece un cierre hermético. 200. Obj: voy a mirar las reglas. 203. HeMe: las reglas son las mismas. 204. Obj: vuelvo al juego. 206. Obj: voy al laboratorio. . . . 260. Obj. me devuelvo. 265. De: selecciono el acero SAE 1045.</p>	<p>128. Obj: Seleccione el material para diseñar la válvula de admisión de un motor de cuatro tiempos y trabajo liviano. 129. HiMe: pues yo pienso que sigo con las mismas reglas. 130. Obj: entonces voy a seleccionar materiales. 132. Obj: tengo que es la válvula de admisión. 133. Obj: empiezo a ubicarla. 137. VaCo: válvula: su misión consiste en la distribución de los gases. La válvula de admisión permite el ingreso de mezcla fresca, mientras que la forma ofrece un cierre hermético. 138. Obj: vuelvo a seleccionar materiales. 141. Ev: ensayo el acero SAE 1020. 143. HeCo: la viabilidad y el factor económico son buenos, en cuanto a condiciones de servicio no me funciona. . . .</p>

Continúa

Continuación

<p>267. He: factor económico: siendo un acero de medio contenido de carbono, su costo comercial es relativamente bajo dentro de la gama de los materiales.</p> <p>268. He: procesos de manufactura: la manufactura de la válvula en este material se realiza mediante el proceso de torneado. La válvula es maquinada entre puntos con buriles de diferentes formas y posteriormente es rectificada.</p> <p>269. He: condiciones de servicio: es un acero de resistencia mecánica media. Su composición química no ofrece buena resistencia a latas, temperatura, aunque puede ser tratado térmicamente. Su vida útil sería limitada dentro del sistema mecánico.</p> <p>270. HeMe: entonces éste no me sirve.</p> <p>271. Obj: me devuelvo y tomo el acero SAE 4340.</p> <p>276. He: factor económico: es un acero aleado, su costo comercial es alto dentro de la gama de los materiales.</p> <p>277. He: procesos de manufactura: la manufactura de la válvula en este material se realiza mediante el proceso de torneado. La válvula es maquinada entre puntos, con buriles de diferentes formas y posteriormente es rectificada.</p> <p>278. He: condiciones de servicio: es un acero de buena tenacidad y resistencia a la fatiga. Por tanto, es resistente a los esfuerzos de choque. Por su contenido de cromo, níquel y molibdeno ofrece muy buenas propiedades a altas temperaturas.</p> <p>279. De: yo voy a seleccionar este acero.</p>	<p>162. HeMe: me doy cuenta que los materiales que considero en cuanto a manufactura y condiciones de servicio, pero en el factor económico no me resultan viables.</p> <p>163. Obj: entonces voy a buscar otros materiales</p> <p>167. Hi: tengo como opción el acero SAE 4340 y el acero SAE 1045</p> <p>170. Ev: ensayo el acero SAE 1045.</p> <p>171. HeCo: el factor económico es más viable, pero en cuanto a condiciones de servicio no.</p> <p>172. Ev: entonces ensayo el acero SAE 4340.</p> <p>174. HeCo: entonces, bueno, en cuanto a factor económico no me resulta viable, pero para mí serían más importante los procesos de manufactura y las condiciones de servicio que me presta el material.</p> <p>175. De: entonces utilizo este material.</p> <p>179. He: factor económico: es un acero aleado, su costo comercial es alto dentro de la gama de los materiales.</p> <p>180. He: procesos de manufactura: La manufactura de la válvula en este material se realiza mediante el proceso de torneado. La válvula es maquinada entre puntos, con buriles de diferentes formas y posteriormente es rectificada.</p> <p>181. He: condiciones de servicio: es un acero de buena tenacidad y resistencia a la fatiga, por tanto, es resistente a los esfuerzos de choque; por su contenido de cromo, níquel y molibdeno, ofrece muy buenas propiedades a altas temperaturas.</p> <p>183. De: confirmo.</p>
--	---

Tabla 4. Codificación de segmentos, Momento III de la experimentación.

Como resultado del registro automático se construyen las rutas de navegación que siguieron los sujetos a lo largo del proceso de solución del problema (figura 8). Las rutas se reconstruyen teniendo en cuenta los eventos registrados. Esta situación permite la búsqueda de patrones de comparación entre los sujetos como análisis complementario a los registros de protocolos de informes verbales. Los eventos que se tuvieron en cuenta fueron: a) consulta de re-

glas, b) consulta de información técnica sobre materiales, c) selección de material, d) información de las partes constituyentes del sistema mecánico, e) evaluación del material seleccionado, f) toma de decisiones, g) consulta del costo de materiales (almacén), h) consulta del proceso de manufactura (laboratorio de procesos de manufactura), e i) consulta del comportamiento mecánico del elemento (laboratorio de Resistencia de materiales).

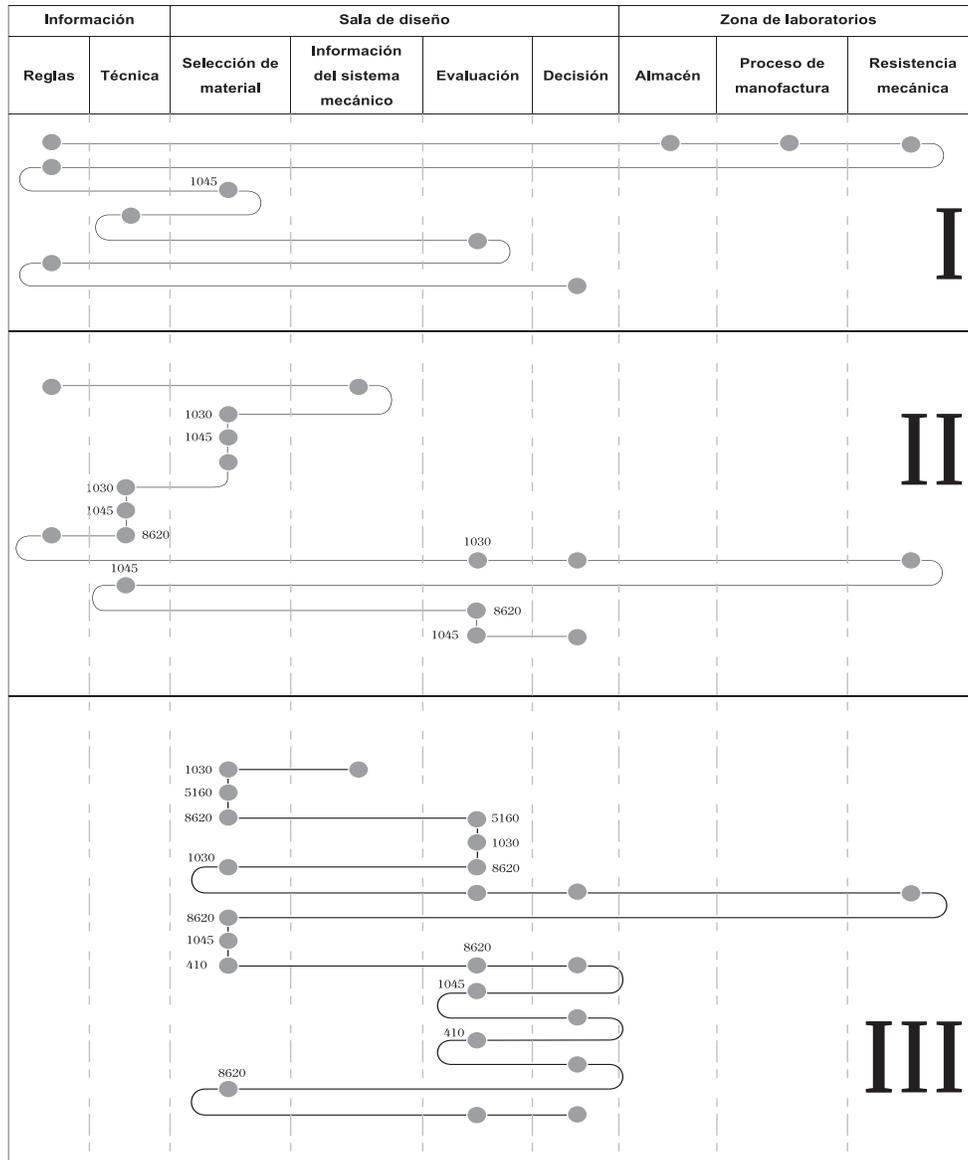


Figura 8. Rutas de navegación de un estudiante del grupo A.

Modelo representativo del estudio

El modelo representativo para llevar a cabo la investigación tiene en cuenta los estudios de Howard y Matheson (1984), en lo concerniente a las redes de deci-

sión, los planteamientos de Goel y Pirolli (1992), quienes caracterizan el diseño como problemas débilmente estructurados, y las premisas de Dobrovolsky, Zablotsky y otros (1970), para la selección

de materiales en un problema de diseño mecánico (Figura 9). La explicación del modelo se basa en dos partes:

1. Ambiente de la tarea: el sujeto identifica el *problema*, el cual estaría definido a partir de un sistema mecánico, representado por el *software*. Por otro lado, hay un *objetivo* (intencionalidad) formulado en términos de especificación óptima de materiales, dadas las *restricciones* de tipo tecnológico (económicas, fabricación, resistencia mecánica, fricción y condiciones térmicas, entre otras).
2. Espacio del problema: es la representación mental que el sujeto tiene del problema y en la cual incorpora: a) *factores de diseño*, ligados a las condiciones de servicio del elemento me-

cánico, su manufactura y el coste total de producción; b) *información adicional*, consistente con el estado actual del problema (McDermott y Doyle, 1980), que se deriva de la experiencia del diseñador (Goel y Pirolli, 1992); c) *planteamiento de alternativas de solución*, que se caracteriza por la presencia de dos o más soluciones posibles al problema; d) *utilidad* asociada a cada alternativa; e) *ordenamiento de prioridades* con base en una escala valorativa de pesos (K_i), de las diferentes variables y las preferencias que tengan los sujetos; f) *decisión*, o síntesis según el criterio de máxima utilidad esperada. En este contexto, el sujeto razona basado en la evidencia objetiva y en sus creencias e inferencias (Moore, 1983).

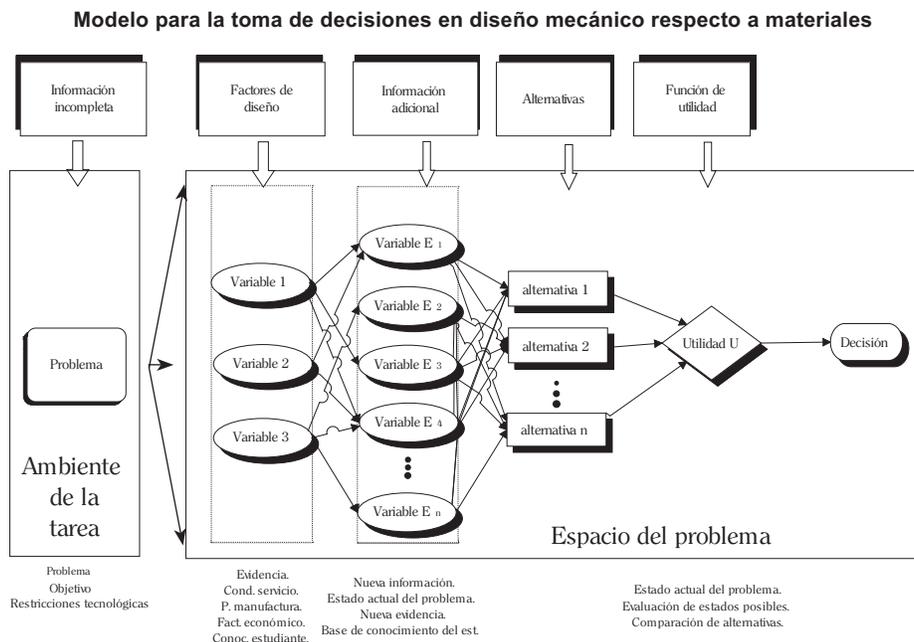


Figura 9. Modelo de la investigación.

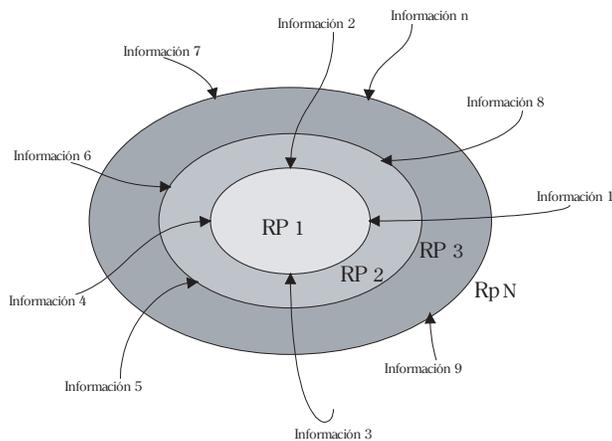
RESULTADOS

El interés central de la investigación se enfocó en el estudio de las relaciones que se dan entre sujetos que revisan su propio proceso y sujetos que revisan la estrategia de un experto cuando solucionan un problema de toma de decisiones en diseño mecánico respecto a materiales. Ello, con el propósito de estudiar los procesos de razonamiento con información incompleta cuando los sujetos solucionan problemas de este tipo; así como para determinar la función de peso que los sujetos asignan a cada uno de los factores de diseño mecánico, respecto a materiales, con base en los datos obtenidos en la experimentación.

Evolución en la representación del problema

Analizadas las rutas de navegación y los protocolos para determinar los procesos de toma de decisiones, se pudo identificar

que los sujetos, en un alto porcentaje, seleccionan el mismo material para el diseño del elemento mecánico. En términos de la información, la base de conocimiento de los sujetos es ampliada cuando integra información adicional que es suministrada por el ambiente computacional. Igualmente, dispone de una serie de reglas mediante las cuales éstos pueden llegar a conclusiones más consistentes a partir del estado actual del problema. En este tipo de razonamiento, se conjugan elementos de tipo lógico, no-monótono, que se pueden representar fácilmente usando predicados de primer orden. Además, se evidencia el desarrollo de niveles de aprendizaje en cuanto a la optimización del diseño mecánico de los elementos. En la medida en que el sujeto evalúa y compara los materiales, la representación del problema va evolucionando de forma progresiva adicionando información a la base de conocimiento (Figura 10).



RP= Representación del problema

Figura 10. Adición de información a la base de conocimiento del sujeto. RP1, RP2,... RPN son las representaciones sucesivas del problema.

Relación entre el conjunto de alternativas de solución y la selección de la misma

En cuanto a la selección de alternativas, los sujetos tienden a reducir su espacio de búsqueda a un conjunto menor de materiales (Wald, 1954), lo cual muestra que los sujetos se van acercando a la solución del problema de una forma parcial. Esto comprueba la apreciación de McCarthy (1980) en relación a la circunscripción de las alternativas a aquellas que satisfagan el diseño óptimo del elemento mecánico como una forma de reducir el problema a otro más simple. El grupo que estudia su propio proceso mantiene esta estrategia en cada uno de los momentos y los materiales seleccionados están en concordancia con los factores de diseño mecánico, consolidando y conservando su estrategia en la solución del problema; mientras que el grupo que observa al experto, inicialmente (momento I), se orienta bajo la misma estrategia, posteriormente la abandona y se ciñe a las reglas del experto.

Relación entre evaluación y comparación de alternativas de solución

Los sujetos utilizan como criterio de terminación del problema, la selección del material al que le corresponde la máxima utilidad esperada (Howard y Matheson, 1984; Shafir 1993; Norvig y Russell, 1996). Una vez los sujetos han evaluado y comparado los materiales que han tomado como alternativas de solución, realizan la elección del material con las proposiciones que constituyen su dominio de conocimiento en el área del diseño mecánico, asignan una

función de peso a los factores del diseño de acuerdo con sus conocimientos, experiencias y procesos de razonamiento, de manera tal que evalúan la acción emprendida y, de esta forma, calculan la utilidad correspondiente y eligen el material que se ajusta al criterio de diseño óptimo. En este proceso, efectivamente, tienen en cuenta la evidencia del problema, las restricciones del diseño, las condiciones de servicio del elemento mecánico, los procesos de manufactura y el factor económico.

Los sujetos inicialmente comparan los materiales con base en la información de los tres factores de diseño, buscando que el material óptimo tenga como viabilidad el 100% en los tres factores. De no cumplirse esta condición, los sujetos recurren a un segundo criterio de comparación, que obedece a las preferencias que tienen frente a los factores de diseño mecánico respecto a materiales y buscan que el material óptimo tenga una viabilidad máxima en las condiciones de servicio y en procesos de manufactura, aunque el costo del material sea relativamente alto.

El conocimiento y la autonomía de quienes estudian sus propios procesos orientan la solución del problema. Los sujetos, en esta condición, consolidan una metodología bien estructurada cuya aplicación controlan, en la medida en que avanzan en la solución del problema. El sujeto razona condicionado a un contexto particular, en donde la adición, verificación y evaluación de la información aumentan su base de conocimiento para afinar una estrategia en la toma de la mejor decisión para el diseño de máquinas.

Los procesos de razonamiento, con información incompleta, son asumidos por los sujetos con base en las proposiciones que poseen con respecto al dominio de conocimiento; condición que identifica problemas débilmente estructurados (Goel y Pirolli, 1992) y que los conduce a razonar, no sólo sobre el estado actual del problema, sino también sobre los estados posibles del mismo. En consecuencia, se puede inferir que los sujetos razonan de forma no-monótona (McDermott y Doyle, 1980).

Desarrollo del problema con y sin la sugerencia del experto

Los sujetos del grupo que estudia sus propios procesos adoptan diferentes estilos en la toma de decisiones. Cada uno consolida su propia estrategia y se regulan internamente a sí mismos, creyendo en sus propias potencialidades, situación que se traduce en seguridad para tomar la decisión. La experiencia adquirida a través de la resolución de varios problemas hace que evolucione su espacio de problema y que cuando se enfrente a situaciones nuevas consolide estrategias aplicadas anteriormente. Las estrategias son consistentes, pero diferentes y de mayor variedad en comparación con el grupo experimental.

Los sujetos del grupo que observa el comportamiento del experto utilizan una estrategia similar a la del grupo de control en la primera situación. Después de observar al experto, tienden a seguir la estrategia del agente externo consultando la información en el mismo orden para luego seleccionar los materiales. No consolidan una estrategia fuerte y se limitan a imitar al

experto, es decir, se regulan por un factor externo (el comportamiento de un modelo). No creen en sus potencialidades, recurren en cierta forma a la estrategia de ensayo-error; de ahí, su cambio de decisión con respecto a la inicialmente adoptada. Esto se traduce en inseguridad, evidente cuando cambian completamente su estrategia desarrollada en el problema inicial (en la primera situación problemática, seleccionan y evalúan dos materiales generalmente, y en la segunda situación problemática, su estrategia es la de seleccionar toda la lista de materiales para tomar su decisión). Se reduce, en consecuencia, la variedad de estrategias y predomina la tendencia de los sujetos a seguir el agente externo.

Función de peso de los factores de diseño mecánico respecto a materiales

Un aspecto relevante fue la aplicación de una función de utilidad a cada acción tomada. Los sujetos, inicialmente, le dan igual peso a todos los factores de diseño (manufactura, servicio y factor económico), con base en una escala de pesos (K_i) (Rivett, 1971), y buscan un punto de equilibrio entre estos tres factores para seleccionar el material óptimo. Esto muestra que los sujetos tienden a maximizar la función de utilidad y a obtener un vector en R^3 , cuyos componentes tienen el mismo peso ($K_1 = K_2 = K_3$), para cada uno de los factores de diseño contemplados. Este resultado concuerda con los estudios de Norvig y Russell (1996) y Kahneman y Tversky (1984) en relación a las preferencias que tienen los sujetos en términos de utilidades y probabilidades subjetivas.

Cuando los sujetos no encuentran el material ideal, emplean el procedimiento de ordenación de preferencias (Resnik, 1988), “diseño de productos de óptima calidad”, seleccionando los factores en el siguiente orden de importancia: 1) condiciones de servicio, 2) procesos de manufactura y 3) factor económico. Argumentan que la vida útil del elemento, dentro del sistema mecánico, es un factor importante a tener en cuenta. En este contexto, el sujeto no sólo razona bajo evidencia objetiva, sino, también, basado en sus creencias e inferencias de los estados posibles en el diseño del elemento mecánico (Moore, 1983).

En cuanto a la función de peso, que los sujetos le asignan a cada una de los factores de diseño, se puede establecer un patrón a través de un modelo matemático para llegar a determinar y predecir la posible ubicación de un vector resultante.

La variable dependiente que se toma para la investigación es considerada como el nivel de maximización de la función de utilidad, entendida ésta como el diseño óptimo respecto a materiales (DOM), (figura 11). La variable dependiente (DOM) se puede representar en tres componentes rectangulares:

$$[DOM] = [(DOM)^2_X + (DOM)^2_Y + (DOM)^2_Z]^{(1/2)}$$

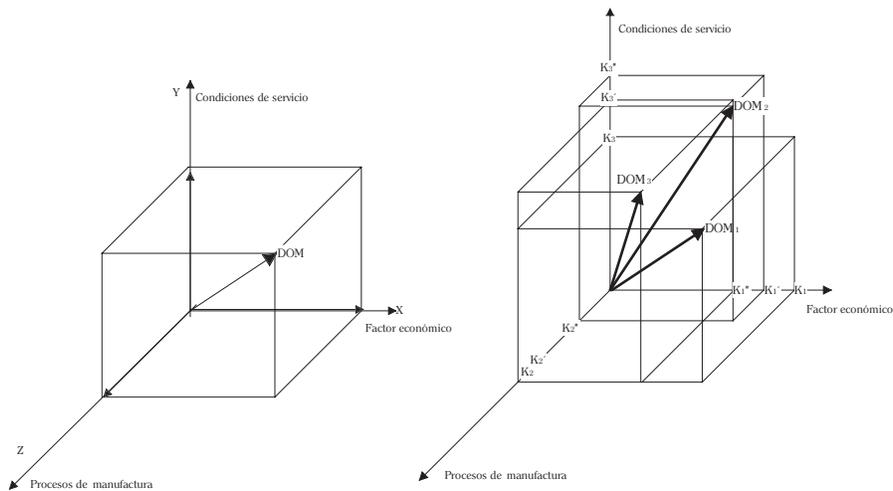


Figura 11. Función de utilidad asumida por los sujetos (vector resultante).

Las componentes rectangulares están discriminadas de acuerdo con las premisas de Dobrovolsky y otros (1970): procesos de manufactura (P1), factor económico (P2) y condiciones de servicio (P3), y se obtiene la siguiente representación funcional:

$$DOM = f(P_1, P_2, P_3)$$

La variable dependiente (DOM) está influenciada por el peso (K_i), asignado a cada una de las premisas, y se expresa de la siguiente forma:

$$DOM = [K_1(P_1)^2 + K_2(P_2)^2 + K_3(P_3)^2]^{1/2}$$

El valor K_i está determinado de acuerdo con las prioridades que el sujeto le asigne a cada premisa y se representa a través de una constante que varía entre $[0 - 1]$, en donde se cumple que:

$$\sum_{i=1}^3 K_i = 1$$

La ecuación $K_1 + K_2 + K_3 = 1$ representa un plano en el espacio, en el que K_1 , K_2 y K_3 son valores no negativos y no nulos. El vector resultante es el que caracteriza la decisión tomada y condiciona la elección del material, que está contenido dentro de la superficie de decisión (figura 12).

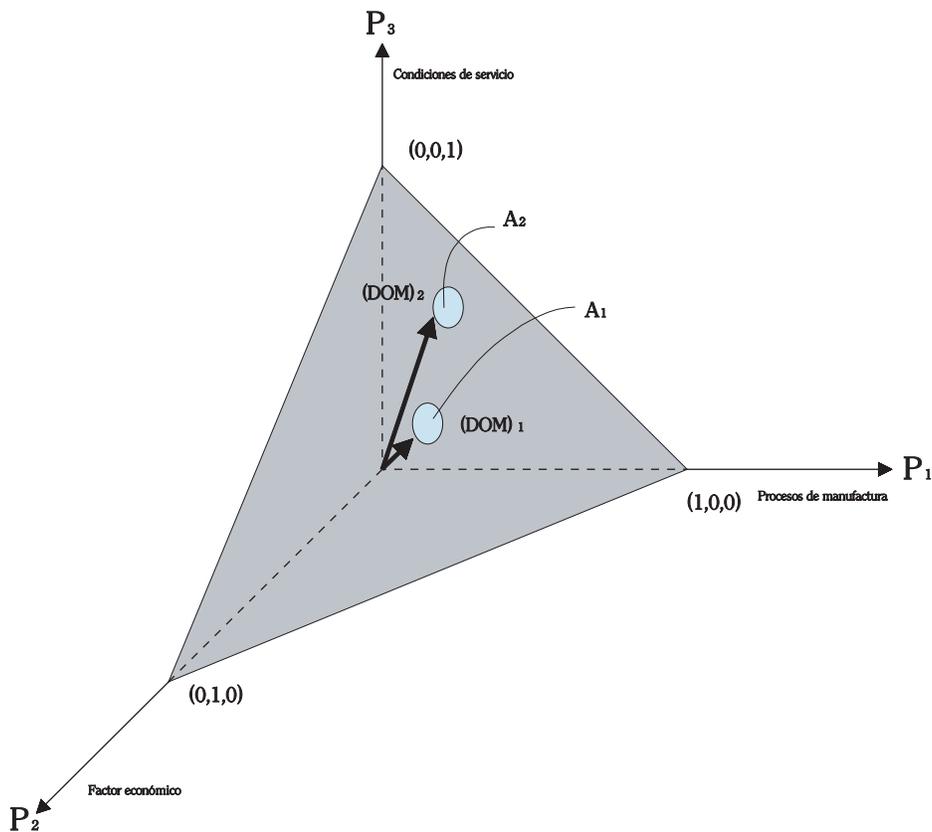


Figura 12. Plano que representa la función de peso para los tres factores de diseño.

El vector que representa la función de utilidad máxima para los sujetos se muestra mediante el vector (DOM)1 (diseño óptimo respecto a materiales), al que le dieron una función de peso igual para todos los factores; vector que está ubicado en una dirección normal al plano (la dirección determinada por el vector $N = i + j + k$).

$$DOM_1 = \left[\left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right]^{(1/2)}$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = \frac{1}{3}$$

Los sujetos, inicialmente, le asignan una función de peso igual a estos factores. En consecuencia, podría afirmarse que la función de utilidad para tomar la decisión puede localizarse dentro del área A1, en la que tendería a ubicarse el vector (DOM)1.

Cuando no se encuentra un material que se ajuste al vector (DOM)1, los sujetos le asignan una función de peso diferente a los tres factores de diseño bajo una condición de ordenación, así:

1. Condiciones de servicio (P3), con peso K_3 .
2. Procesos de manufactura (P2), con peso K_2 .
3. Factor económico (P1), con peso K_1 .

Esta condición de orden se representa mediante el vector (DOM)2, donde se cumple que:

$$P_3 > P_2 > P_1 \text{ y } K_3 > K_2 > K_1; K_i P_i \neq 0$$

Puede afirmarse que los sujetos asignan una segunda función de utilidad máxima en la selección de los materiales, que se encuentra localizada dentro del área A_2 , y tiende a ubicarse hacia la parte superior derecha del área A^1 , como se indica en la figura 12, es decir, tiende a ubicarse hacia el vértice de condiciones de servicio.

CONCLUSIONES

- Los estudiantes que siguen el modelo del experto desarrollan heteronomía en el proceso de toma de decisiones, situación que limita el desarrollo creativo en la solución de problemas y no se consolida en ellos un proceso fuerte, pues se regulan por un medio externo (experto). No confían en sus potencialidades, recurren en cierta forma al ensayo-error, de ahí su cambio de decisión.
- La libertad de los agentes para ver su propio proceso genera mayor variedad de soluciones y valoración consciente de las consecuencias de sus decisiones en la solución de problemas de diseño de máquinas. En esta etapa, los agentes consolidan estrategias propias, regulándose a sí mismos y valorando sus potencialidades.
- La simulación del comportamiento del experto actúa como un ordenador en el proceso de toma de decisiones de los sujetos; esto se evidencia en la reducción de la búsqueda de alternativas de solución. El proceso del agente consiste en regularse inicialmente con sus propias reglas, las cuales están en concordancia con los factores de dise-

ño, y posteriormente regulándose con las reglas del experto.

- El estudio del propio proceso de toma de decisiones repercute en una mayor autonomía y variedad de soluciones, resultados que son fundamentales para formar la capacidad creativa de un diseñador.
- El comportamiento de los agentes al seleccionar los materiales se evidencia en una estrategia de ordenamiento de preferencias según el siguiente orden de eventos: a) condiciones de servicio, b) procesos de manufactura y c) factor económico, situación que es consecuente con la toma de decisiones acertadas en un proceso de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, J. (1995). *Cognitive psychology and its implications*. Fourth editions. New York: W.H. Freeman.
- Apostol, T. (1998). *Cálculus*; Volumen I "Cálculo con funciones de una variable, con una introducción al álgebra lineal". Segunda edición. Editorial Reverte Colombiana, S.A.
- Callister, W. (1995) *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Editorial Reverte, S.A.
- Chandrasekaran, B.; Glasgow J., y Narayanan H. (1995). *Diagrammatic Reasoning, Cognitive and computational perspectives*. Cambridge, Ma.: AAAI Press/The MIT Press.
- Cohen, R. (1995). *Empirical Methods for Artificial Intelligence*. Cambridge, Ma.: The MIT Press.
- Dobrovolsky, V.; Sablonsky, K., & otros (1970). *Elementos de máquinas*. Moscú: MIR.
- Dunlop, W. (1951). The representation of choice. *Terminological Review Quart. Bull.* No 3, September.
- Ericsson, K. A., y Simon H. A. (1993). *Protocol Analysis: Verbal Report as Data*. Cambridge, Ma.: The MIT Press.
- Ferguson, C. R. (1986). *Internal combustion engines, Applied thermosciences*. Ed. Jhon Wiley & sons.
- Hänchen, R. (1976). *Resistencia a la fatiga*. Labor, S.A.
- Handbook of Theoretical Computer Science (1984). Volume B, Formal Models and Semantics. Edited by Jan Van Leeuwen, the Netherlands: Utrecht University.
- Howard, R., y Matheson, J. (1984). Influence diagrams. In Howard R. and Matheson J., editors. *Reading on the principles and applications of decision Analysis*. Strategic decisions group, California: Menlo Park.
- Israel, D. (1985). A short companion to the naïve physics, in Hobbs J., y Moore R. (eds). *Formal Theories of the commonsense world*. New Jersey: Alex Publishing Corporation.
- Goel, V., Pirolli P. (1992). The Structure of Design Problem Spaces. En: *Cognitive Science*, vol. 16(3) julio-septiembre, pp. 395-429.
- Keeney, R. L., y Riffa. (1976). *Decisions With multiple objectives: preference and value tradeoffs*. New York: Wiley.
- Kuipers, B. (1994). *Qualitative Reasoning: Modeling and Simulation with incomplete knowledge*. Cambridge, Ma.: The MIT Press.
- Mabie, Hamilton H., & Ocvirk, F. (1975). *Mechanisms and Dynamics of Machinery*. New York: Ed. Jhon Wiley & Sons.
- Maldonado, L. (2001). *Análisis de protocolos: Posibilidad metodológica para el estudio de procesos cognitivos*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

- Maldonado, L., y Andrade E. (2001). *Ambiente computarizado para el aprendizaje autodirigido del diseño ACA2*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional y Colciencias.
- McCarthy (1984). *Applications of circumscription to formalizing commonsense knowledge, AAAI Workshop on Non-Monotonic Reasoning*. New York: New Paltz.
- McDermott and Doyle J. (1980). Non monotonic logic I. *Artificial intelligence*. New York: Ed. Jhon Wiley & Sons.
- Minsky, M. A. (1978). *Framework for representing knowledge. The psychology of computer vision*. New York: Mc Graw Hill.
- Moore, R. (1985). The role of logia in knowledge representation and commonsense reasoning. En: R. Brachman and H. Levesque (eds), *Readings in Knowledge representation*. Palo alto, CA: Kaufmann.
- Newell, B., & Simon, H.A. (1972). *Human problem solving. Englewood Cliffs*. New York: Prentice Hall.
- Niemann, G. (1967). *Tratado teórico práctico de elementos de máquinas; Cálculo, diseño y construcción*. Labor.
- Norton (1998). *Machine Desing and integrated approach*. New York: Editorial Prentice Hall.
- Raiffa, & Schlaifer, R. (1968). *Applied statistical decision theory*. Cambridge, Ma.: The MIT Press.
- Raiffa, H.; Keeney, R., y Hammond J. (1999). *Decisiones inteligentes*. Bogotá: Norma.
- Reiter, R. (1980). A logia for default reasoning, *Artificial. Intelligence*. 13, pp. 81-132
- Resnik, M. D. (1998). *Elecciones: una introducción a la teoría de la decisión*. España: Gedisa.
- Rich, E., y Knight, K. (1994). *Artificial intelligence*. New York: Mc Graw Hill Interamericana.
- Rivett, R. L. (1971). Learning decision lists. *Machine learning*. 2(3), pp. 229-246.
- Russell S., Norvig P. (1996). *Inteligencia artificial, un enfoque moderno*. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. pp. 513-515.
- Shapiro Stuart C. (1987). *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. Volume 1 y 2. Editor in Chief. Wiley Interscience publication, New York: Jhon Wiley & Sons.
- Smith, N. (1956). A calculus for ethics: A theory of the structure of value. En: *Behavioural Science*. 1 abril. New Jersey: Chandling-Publishing Co.
- Shackerfold, F. (1995) *Ciencia de materiales para ingenieros*. Tercera edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Tversky, A., y Kahneman, D. (1974). Judgment Under uncertainty: Heuristics and biases. En: *Science* 185, pp. 1124-1131.
- Wald, A. (1954). *Statistical Decision Functions*. New York: Jhon Wiley & Sons.
- White, D. J. (1975). *Teoría de la decisión*. Alianza Universitaria.
- Zaccagnini, J., & Adarraga, P. (1994). *Psicología e inteligencia artificial*. Trotta. S.A.

ARTÍCULO RECIBIDO: 17-02-2005

Y APROBADO: 11-11-2005