

# Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sin fin

## Use of rules based systems and cases based systems for worm gear design

Jorge Laureano Moya-Rodríguez<sup>I</sup>, Ana María Becerra-Ferreiro<sup>II</sup>, César A. Chagoyén-Méndez<sup>I</sup>

I Universidad Central Marta Abreu de Las Villas Facultad de Ingeniería Mecánica. Santa Clara. Cuba

Correo electrónico: [jorgemr@uclv.edu.cu](mailto:jorgemr@uclv.edu.cu)

II Universidad Autónoma de Zacatecas. Facultad de Ingeniería Mecánica. México

Recibido: 16 de septiembre de 2011

Aceptado: 25 de febrero de 2012

---

### Resumen

Las técnicas de Inteligencia Artificial se aplican hoy en día a diferentes problemas de Ingeniería, especialmente los Sistemas Basados en el Conocimiento. Entre estos últimos los más comunes son los Sistemas Basados en Patrones, los Sistemas Basados en Reglas, los Sistemas Basados en Casos y los Sistemas Híbridos. Los Sistemas Basados en Casos parten de problemas resueltos en un dominio de aplicación y mediante un proceso de adaptación, encuentran la solución a un nuevo problema. Estos sistemas pueden ser usados con éxito para el diseño de engranajes, particularmente para el diseño de transmisiones por tornillo sin fin, sin embargo ello constituye un campo de las aplicaciones de la Inteligencia Artificial aún inexplorada. En el presente trabajo se hace una comparación del uso de los Sistemas Basados en Regla y los Sistemas Basados en Casos para el diseño de transmisiones por tornillo sin fin y se muestran los resultados de la aplicación de los sistemas basados en regla al diseño particular de una transmisión por tornillo sin fin.

**Palabras claves:** tornillo sin fin, engranajes, sistemas basados en casos, sistemas basados en reglas, inteligencia artificial.

### Abstract

Nowadays Artificial Intelligence techniques are applied successfully to different engineering problems, especially the "Knowledge Based Systems". Among them the most common are the "Frame based Systems", "Rules Based Systems", "Case Based Systems" and "Hybrid Systems". The "Case Based Systems" (CBS) analyze solved problems in an application domain and by means of a process of adaptation; they find the solution to a new problem. These systems can be used successfully for the design of gears, particularly for designing worm gears; nevertheless it constitutes a field of the applications of artificial intelligence even unexplored. A comparison of the use of "Rules Based System" and "Cases Based System" for worm gear design is made at this paper. It is also showed the results of applying the "Rule Based Systems to a particular design of a worm gear transmission.

**Key words:** worm gears, gears, case based systems, rule based systems, artificial intelligence.

## Introducción

### Algunas definiciones necesarias

Los Sistemas Expertos usan la Inteligencia Artificial para resolver problemas. Estos sistemas emulan las habilidades de un experto en la solución de un tipo específico de problemas en cuestión. Por lo general los Sistemas Expertos son Sistemas Basados en Reglas. Las bases de conocimientos en los sistemas expertos deben tener o abarcar un dominio estrecho y no pueden ocuparse o enfocarse a la solución de un gran número de problemas. Muchos sistemas expertos se utilizan en el diseño y en la fabricación [5]. Los lenguajes de programación que son basados en reglas usan o definen una serie de acciones a ser ejecutadas para una situación particular. Una regla es una sentencia de tipo: si – entonces (if – then). El “si” especifica el dato o serie de datos que hace que se aplique la regla. El “Entonces” especifica las acciones que deben ser tomadas que hacen que la regla se aplique [6]. En la literatura existen muy pocos ejemplos de aplicación de los sistemas expertos al diseño de transmisiones por engranajes, uno de los trabajos más sobresalientes en este sentido es el de Yiu que data de 1994 [7].

### Estructura general de un Sistema Basado en Reglas, su aplicación al diseño de transmisiones por tornillo sin fin

Todo Sistema Basado en Reglas consta de dos partes principales: la base de conocimientos y la máquina de inferencia o máquina de razonamiento. La base de conocimientos de los Sistemas Expertos contiene tanto el conocimiento “Factual” como el Heurístico. El conocimiento Factual es aquel conocimiento del dominio de la tarea, el cual es ampliamente compartido, este se encuentra típicamente en libros de textos y revistas. El conocimiento Heurístico es menos riguroso, más basado en la experiencia, más de juicio de acuerdo a la experiencia. Es el arte de las buenas suposiciones. El ingrediente más importante de un Sistema Experto es el conocimiento. El poder de los Sistemas Expertos reside en el conocimiento específico de alta calidad que contiene la base de conocimientos.

Para aplicar un Sistema Basado en Reglas a una transmisión por tornillo sin fin, lo primero que hay que realizar es una base de conocimientos donde se declaren explícitamente las *restricciones*, *dominios* y *procedimientos de cálculo* que intervienen en la solución del problema. Por otra parte es necesario elegir qué tipos de perfiles y de acuerdo a qué norma se van a realizar los cálculos.

Estas bases de conocimientos dependen precisamente del conocimiento de los que las crearon y permiten resolver la mayoría de los problemas que pueden presentarse en una transmisión por tornillo sin fin, tales como:

- Diseñar, a partir de unas condiciones de trabajo determinadas, una transmisión por tornillo sin fin.
- A partir de una transmisión ya diseñada, determinar la potencia que es capaz de transmitir.
- A partir de una transmisión con determinados parámetros geométricos y una potencia dada a transmitir, establecer el material que cumple con los requerimientos dados.
- Realizar la Ingeniería Inversa de una transmisión por tornillo sin fin.

Por ejemplo el módulo, es un parámetro normado debe tener un “*dominio*” definido por los valores estandarizados del mismo. Una “*restricción*” por ejemplo, en el caso particular de las transmisiones por tornillo sin fin, puede ser la eficiencia, la cual debe ser mayor del 85% por definición de los creadores de la base de conocimientos. En el “*procedimiento de cálculo*” aparecen expresiones para la determinación de los parámetros geométricos, de resistencia, etc.

El lenguaje de escritura de la base de conocimiento se concibió de tal manera que pudiera ser entendido por la mayoría de los Ingenieros, a continuación se muestran algunos ejemplos de la base de acuerdo a las normas ANSI/AGMA [8]:

```
{
SINFIN
% B.C Para el cálculo de una transmisión por tornillo sin fin según Norma AGMA
&
d1>=(1/3)*pow(aw,0.875) and d1<=(1/1.6)*pow(aw,0.875)
zx < z1
mx<= m
aw >=a
&
```

```
!  
-esc(datos.txt;:"",-)  
!  
}  
Material del tornillo  
[  
Mt  
% MATERIAL DEL TORNILLO  
!  
+esc (datos.txt;:"MATERIAL DEL TORNILLO",+)  
+esc (datos.txt;:Mt,+)  
!  
@  
"ACEROS ENDURECIDOS"  
"ACEROS MEDIOS EN CARBONO"  
"ACEROS ALTOS EN CARBONO"  
"HIERRO FUNDIDO"  
@  
]  
Módulo  
[  
m  
% MODULO  
!  
+esc (datos.txt;:"MODULO",+)  
+esc (datos.txt;:m,+)  
!  
/  
-> 1  
-> 1.25  
-> 2  
-> 2.5  
-> 3.15  
-> 4  
-> 5  
-> 6.3  
-> 8  
-> 10  
-> 12.5  
-> 16  
-> 20  
-> dpt/Zt  
-> dpc/Zc  
/  
]
```

El poner todas las expresiones posibles que relacionan al módulo con el resto de los parámetros permite una mayor versatilidad de la base de conocimientos e inclusive realizar el proceso de ingeniería inversa. De manera similar se procedió con el resto de los parámetros. Es decir, que cualesquiera que sean los datos, el sistema a través del proceso de "inferencia" [9] es capaz de hallar una solución. De la misma forma se procedió con la velocidad de deslizamiento, la eficiencia, la potencia, las tensiones, etc.

En la figura 1 se muestra una imagen de los datos a suministrar y en la figura 2 los resultados luego de haberse realizado el proceso de inferencia.

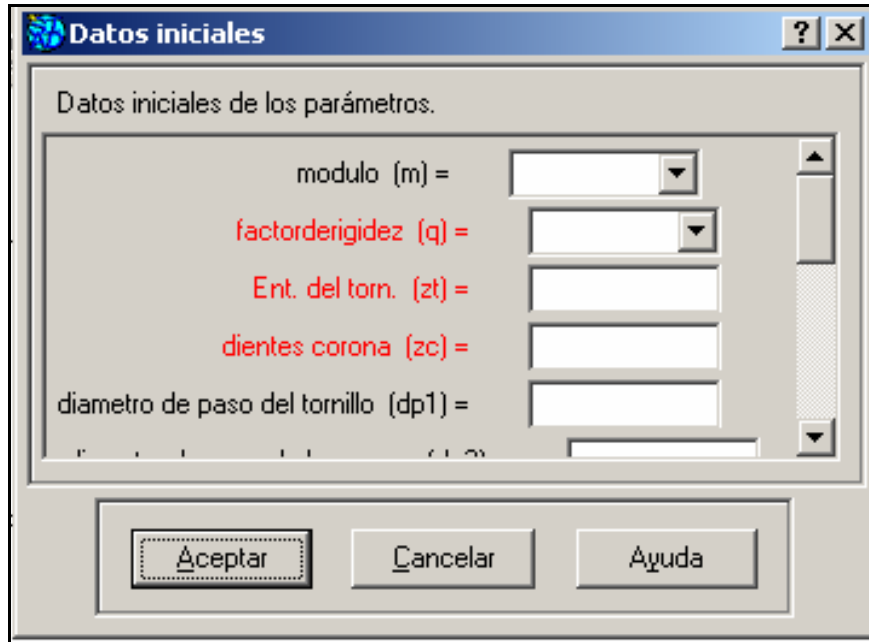


Fig. 1. Introducción de datos

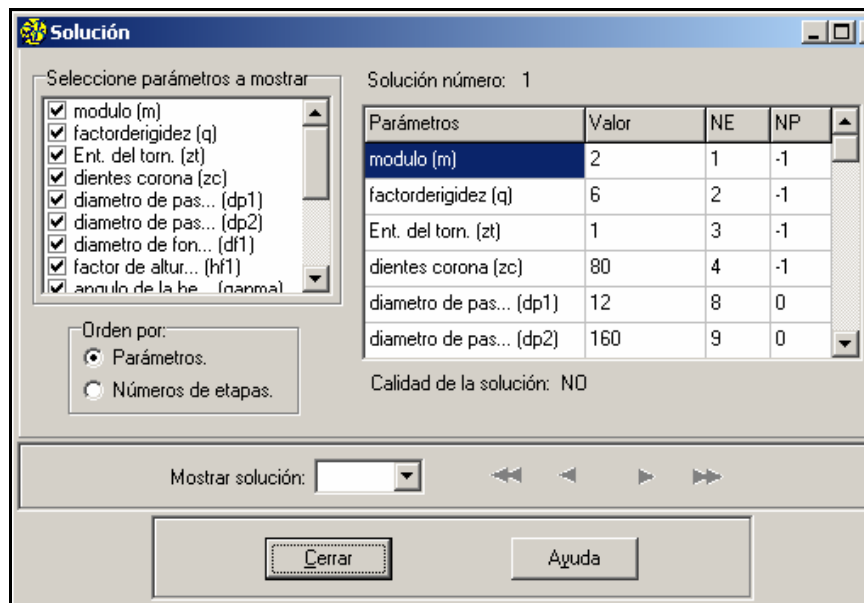


Fig. 2. Resultados después de la inferencia

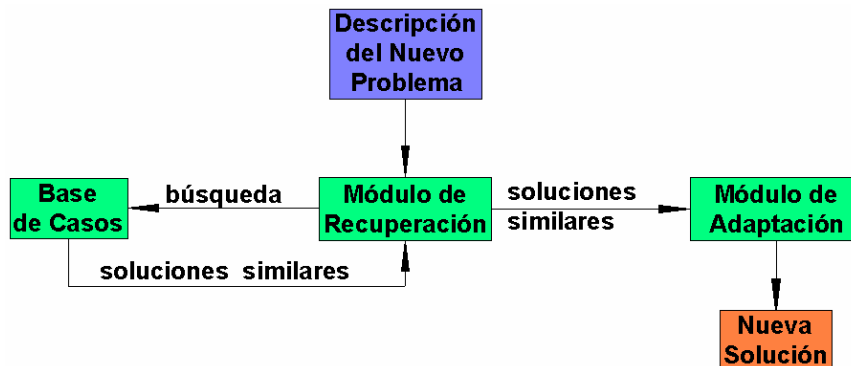
### El Razonamiento Basado en Casos. Estructura General de un Sistema Basado en Casos

El Razonamiento Basado en Casos significa usar viejas experiencias para comprender y resolver nuevos problemas. En él quien razona recuerda una situación previa, similar a la actual y usa esto para resolver el nuevo problema. En general, un caso consiste en la descripción de un problema y la solución dada al mismo.

El diseñador a la hora de elaborar un caso, primero debe decidir qué lo comprende y conforma, ya que éste no es más que la descripción de un problema y la solución dada al mismo.

Un Sistema Basado en Casos típico consta de 3 partes principales: la Base de Casos, el Módulo de Recuperación y el Módulo de Adaptación (Figura 3). Los casos son problemas resueltos y almacenados en la Base de Casos. Cuando hay un nuevo problema que resolver, éste es descrito para el Módulo de Recuperación, el cual realiza una búsqueda en la Base de Casos y encuentra problemas o casos similares.

Estos problemas o casos similares resueltos son recuperados (soluciones similares) y enviados al Módulo de Adaptación, donde son analizados para construir una solución para el nuevo problema.



**Fig. 3.** Estructura de un Sistema Basado en Casos típico

Una vez hallada la solución, se almacena junto con la descripción del problema en la Base de Casos, constituyendo un nuevo caso.

En el establecimiento de los métodos de adaptación se hace imprescindible el conocimiento de los expertos en este dominio. La adaptación de un caso puede ser llevada a cabo por la transformación de un caso solo para ajustarlo a los requerimientos de la nueva situación o mediante la composición apropiada de partes de varios casos. La adaptación a menudo es muy difícil y puede ser eludida del todo, es por esto que ella ha recibido mucha menos atención que la recuperación.

### Aplicación del Razonamiento Basado en Casos al diseño de transmisiones por tornillo sin fin

Uno de los métodos de la Inteligencia Artificial que puede usarse para el diseño de transmisiones por tornillo sin fin es el Razonamiento Basado en Casos. Particularmente para el diseño de estas transmisiones es difícil definir el mecanismo a seguir para elaborar un nuevo diseño, sobre todo en lo referido a la determinación de la secuencia de pasos, porque existen ciertas reglas comúnmente aceptadas y muchas recomendaciones, pero no hay un solo camino para resolver la tarea, y a menudo más de una solución es aceptable. Sin embargo, los diseñadores no tienen siempre acceso a los casos requeridos, ya que se encuentran dispersos en los archivos de diseño, en publicaciones, en su memoria o la de otros diseñadores.

La explotación de un Sistema Basado en Casos trae consigo:

- La incorporación de nuevos diseños comprobados.
- La mejora de los diseños existentes.
- Una disminución en el tiempo de elaboración del diseño.
- La posibilidad de elaborar variantes para compararlas en busca de la mejor.
- Mejorar la calidad y competitividad de los diseños.

En las transmisiones por tornillo sin fin un caso está compuesto por:

- Especificaciones mínimas necesarias para comenzar el diseño (descripción del problema).
- El plano de la rueda dentada (solución del problema).

Las especificaciones mínimas necesarias para comenzar el diseño según varios expertos contienen:

- La potencia a transmitir.
- La velocidad angular
- El material
- Características funcionales de la transmisión (en qué equipo va a trabajar el engranaje).
- Equipamiento tecnológico para acometer su posible construcción.

### **Los rasgos de semejanza**

Lo primero que se debe realizar para aplicar el Razonamiento Basado en Casos a las transmisiones por tornillo sin fin es establecer los llamados rasgos de semejanza. Para poder realizar la descripción más general que puede hacerse de una transmisión por tornillo sin fin atendiendo a su diseño fue necesario consultar especialistas de esta rama (expertos en diseño), a través de encuestas y entrevistas, tanto a diseñadores de la industria como a profesores de esta materia. Se tomó la decisión de trabajar con el mayor número de expertos posible, con un diseño no experimental, basado en el muestreo intencional.

La primera interrogante que se les formuló a los expertos fue la siguiente:

¿Cuáles son las características (rasgos) a través de los cuales puede ser descrita una transmisión por tornillo sin fin, desde el punto de vista del diseño, que la diferencian de otra?

Las encuestas y entrevistas se realizaron a un total de 30 expertos, entre ellos diseñadores de la industria, profesores de Diseño de Elementos de Máquinas y de Resistencia de Materiales y otros ingenieros de experiencia. Se consultaron también criterios de la literatura [10]. Esta primera interrogante arrojó que una transmisión por tornillo sin fin puede ser descrita a través de 16 características o rasgos primarios:

- 1- Potencia a transmitir.
- 2- Características de los materiales de la corona y el tornillo.
- 3- Revoluciones por minuto a que gira el tornillo.
- 4- Tipo de lubricación.
- 5- Factor de rigidez o factor de diámetro del tornillo.
- 6- Ángulo de hélice.
- 7- Tipo de perfil del diente.
- 8- Distancia entre los ejes del tornillo y la rueda sin fin.
- 9- Longitud de la parte roscada del tornillo sin fin.
- 10- Ancho de la corona de la rueda sin fin.
- 11- Módulo normal.
- 12- Distancia entre los centros de presión de los rodamientos del tornillo sin fin.
- 13- Distancia entre los centros de presión de los rodamientos de la rueda.
- 14- Coeficiente de desplazamiento de la rueda.
- 15- Número de espiras en el tornillo sin fin.
- 16- Número de dientes de la rueda.

Posteriormente se les presentó a los expertos una encuesta en forma de tabla, donde aparecía la última versión de los rasgos de semejanza que se había obtenido como resultado de la primera interrogante, y los expertos debían calificarlos como: Muy Importante; de Importancia Media y Menos Importante.

### **La función de semejanza**

La medida numérica del grado de semejanza entre dos problemas se calcula mediante una expresión analítica denominada función de semejanza, la cual integra los resultados alcanzados en la comparación rasgo a rasgo.

La función de semejanza utilizada en este trabajo consiste en la suma ponderada de los resultados de las comparaciones por rasgos, es decir:

$$D_{(u,v)} = \frac{\sum_{l=1}^N W_l \cdot \delta_l(u,v)}{\sum_{l=1}^N W_l} \quad (1)$$

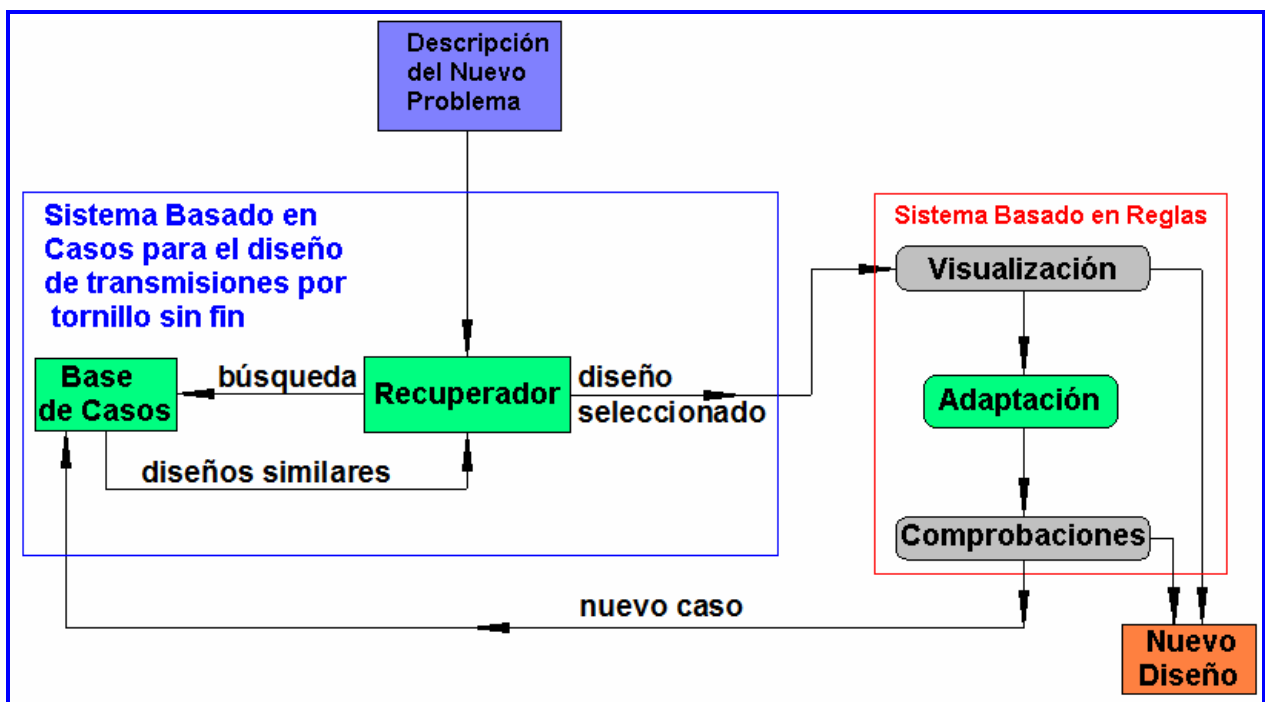
donde:

- (u,v) - son objetos del universo o dominio.
- N - es la cantidad de comparaciones a nivel de rasgo.
- $W_i$  - es la importancia asociada a la comparación del rasgo i.
- $\delta_i(u,v)$  - es la función o criterio de comparación del rasgo i,  $i = 1 \dots n$ .

La selección de la función de semejanza adecuada sólo es posible confirmarla mediante la práctica. Por lo que la amplia utilización de ella puede conllevar a reajustes en los coeficientes de acuerdo con los resultados prácticos, en el sentido de que cada vez sea más efectiva la función en la detección de los casos más semejantes.

Una vez que los casos son recuperados eficientemente, un razonador basado en casos debe adaptar la solución contenida en los casos recuperados a las necesidades de la situación actual. Esto ocurre cuando difiere significativamente el caso recuperado y la descripción problemática dada como entrada. El proceso de adaptación busca las diferencias prominentes y entonces aplica reglas para disminuir dichas diferencias.

Cuando se presenta un nuevo problema, no contemplado exactamente igual en la Base de Casos, el mismo se soluciona a través de un sistema experto, es decir a través de un Sistema Basado en Reglas, y luego la solución de este problema y la descripción del mismo pasan a formar parte de la Base de Casos (ver Figura 4)



**Fig. 4.** Combinación del Sistema Basado en Casos con el Sistema Basado en Reglas para la solución de un nuevo problema

Cuando se tiene la descripción del problema y su solución, se entran a través del Sistema Basado en Reglas y se realizan las correspondientes comprobaciones (resistencia al contacto, resistencia a la flexión, restricciones geométricas, etc.). Luego de esto es que el caso puede ir a formar parte de la Base de Casos. Este paso de realizar las comprobaciones se efectúa como validación de los casos, es decir, que los casos que van a formar parte de la Base de Casos, estén previamente comprobados. Esto no quiere decir que sea el mejor diseño o el óptimo, pero sí una variante de diseño sin falla.

Con respecto a lo anterior, hay que tener en cuenta que los casos almacenados deben ser suficientemente diferentes entre sí como para no hacer crecer innecesariamente la Base de Casos (lo que podría hacerla inoperante). Por otro lado los casos almacenados no deben ser tan diferentes entre sí, que traiga como consecuencia que al realizar una búsqueda o recuperación no aparezca al menos un caso suficientemente similar al nuevo problema. También toma fuerza la idea de que en alguna parte del sistema deben aparecer observaciones vinculadas a cada caso en las que se guarden las experiencias de casos resueltos y cómo se resolvieron, advertencias, sugerencias, etc.

Si se posee la descripción del problema únicamente, ésta se introduce a través del Sistema Basado en Casos e inmediatamente el Módulo de Recuperación va a la Base de Casos, a través de una función de semejanza y de los rasgos de semejanza y localiza él o los casos semejantes (descripción y solución del problema), lo devuelve y a través del Módulo de Adaptación, que no es más que el propio Sistema Basado en Reglas, se modifica o constituye ya la solución del problema planteado.

Como se dijo, existen otras dos variantes: cuando se poseen los planos de la transmisión y cuando no se posee ni la descripción ni la solución. En la primera variante se pueden tener dos objetivos:

- 1- Que la transmisión pase a formar parte de la Base de Casos.
- 2- Realizar la comprobación de la transmisión por tornillo sin fin.

Cuando se tiene el primer objetivo, el Sistema Basado en Reglas tiene que ser capaz, con pocos datos (potencia, velocidad de rotación, etc.) de conformar el sistema de cargas y luego realizar las correspondientes comprobaciones. Así es que la transmisión puede llegar a formar parte de la Base de Casos. Para cumplir el segundo objetivo se emplea el Sistema Basado en Reglas única y exclusivamente.

En la segunda variante, cuando no se tiene la descripción ni la solución, el usuario debe conocer algunos aspectos o tomar algunas decisiones con respecto a las condiciones de trabajo, el material, la potencia y la velocidad de rotación.

Entonces es que utilizando el Sistema Basado en Reglas se puede llegar a diseñar el engranaje (descripción del problema y solución) y luego decidir si va a formar parte de la Base de Casos.

En los últimos años se utilizan los sistemas híbridos con mucha aceptación sobre todo en el caso de la medicina [11], sin embargo esta no es una práctica frecuente en la Ingeniería Mecánica y mucho menos en las transmisiones por engranajes. El ambiente del Sistema Híbrido para tornillo sin fin, es la integración del Sistema Basado en Reglas y el Sistema Basado en Casos. Por tanto el Sistema Basado en Reglas debe tener dos opciones adicionales:

ALMACENAR: mediante la cual se guardarán en la Base de Casos los tornillos sin fin que son entrados por cualquiera de las dos variantes de entrada.

RECUPERAR: a través de esta opción el sistema, después de entrado el nuevo problema, podrá ir a la Base de Casos y buscar un caso que se aproxime lo más posible al entrado, mostrarlo y a partir de aquí comenzar a través de las opciones del propio Sistema Basado en Reglas, la adaptación del caso.

## Conclusiones

Los Sistemas Basados en el Conocimiento ofrecen una opción adecuada para crear un sistema capaz de elaborar el diseño de transmisiones por tornillo sin fin. La base de conocimientos creada y el Sistema Basado en Reglas permiten resolver problemas de diseño de transmisiones por tornillo sin fin, ya sea de diseño tradicional o de Ingeniería Inversa. Esto se debe a que para encontrar una solución dicho sistema realiza una búsqueda heurística y no sigue un algoritmo predeterminado.

Al comparar la aplicación de los Sistemas Basados en Reglas con los Sistemas Basados en Casos para el diseño de las transmisiones por tornillo sin fin se puede concluir que la aplicación de uno u otro dependen del tipo de problema a abordar. Si se trata de un diseño tradicional de una transmisión y se dispone de una Base de Casos voluminosa el Sistema Basado en Casos es más efectivo y seguro, por cuanto sigue la misma lógica del diseñador al abordar esta tarea. En caso contrario es mejor utilizar un Sistema Basado en Reglas.



La solución ideal es un Sistema Híbrido. La estructura de un Sistema Híbrido da respuesta a las tareas fundamentales que se plantean en la bibliografía como problemas comunes a resolver cuando se diseña una transmisión por tornillo sin fin.

## Referencias

1. Buckingham Eliot K. "Taking Guesswork out of worm gear design". *Machine Design Magazine*, 1975, p. 82-86.
2. Bernd-R. H, *et al.* "Determination and Optimization of the contact pattern of worm gears". *Gear Technology magazine*. 2003. p. 12-17.
3. Litvin Faydor, L., González Pérez, I., Yukishima, K., *et al.* "Design, simulation of meshing and contact stresses for an improved worm gear drive". *Mechanism and Machine Theory*. 2007, vol. 42, p. 940–959. ISSN 0094-114X.
4. Daizhong, S. y Datong, Q. "Integration of numerical analysis, virtual simulation and finite element analysis for the optimum design of worm gearing". *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 138, n°1-3, p. 429-435. ISSN 0924-0136.
5. Freeman-Hargis, J. "Rule-Based Systems and Identification Trees" *Advanced Engineering Informatics*. 2008, vol. 22, n° 3, p. 281. [Consultado el: 10 de febrero de 2011]. Disponible en: <http://ai-depot.com/Tutorial/RuleBased-Methods.html> .
7. Yiu-Wing, C. y Siang-Kok, S. "A knowledge-based expert system for gearing design application using Prolog and C". *Advances in Engineering Software*. 1994, vol. 19, n° 3, p. 149-159. ISSN 0965-9978
8. ANSI/AGMA. *Design Manual for Cylindrical Worm gearing*. ANSI/AGMA 6022-C93. Alexandria, Virginia, USA. American National Standard. American Gear Manufacturers Association. 1993. ISBN 1-55589-618-9.
9. Russell, S. y Norvig, P. "Inteligencia Artificial. Un Enfoque Moderno". México: Prentice Hall, 2005, p. 280 – 310. ISBN 968 – 880 – 682 X.
10. Calixto Sirene, B., Llamas Soris, J. y Otero Pereiro, L. "Modelo matemático para el cálculo de las transmisiones por engranaje sin fin cilíndrico". *Ingeniería Mecánica*. 2001. vol. 4, n° 4, p. 45-50. [Consultado el: 10 de febrero de 2011]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/327/667> . ISSN 1815-5944.
11. Ting, S.L., Kwok, S. K., Tsang, H.C. *et al.* "A hybrid knowledge-based approach to supporting the medical prescription for general practitioners: Real case in a Hong Kong medical center". *Knowledge-Based Systems*. 2011, vol. 24, n° 3, p. 444-456. ISSN 0950-7051.