

DISEÑO DE TRANSMISIONES POR ENGRANAJES PARA REDUCTORES MEDIANTE RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

DESIGN OF GEAR TRANSMISSIONS FOR REDUCERS BY MEANS OF CASE BASED REASONING

Robert Hernández-Ortega¹, César A. Chagoyén-Méndez, Feliberto Fernández-Castañeda, Jorge L. Moya-Rodríguez

¹Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Santa Clara. Cuba.
E mail: robertho@uclv.edu.cu

Resumen

Los reductores por engranajes cilíndricos con contacto exterior tienen una amplia aplicación en la industria. El objetivo de esta investigación es facilitar el diseño de estos equipos, mediante la aplicación de la técnica de la inteligencia artificial conocida como razonamiento basado en casos, al diseño de sus transmisiones. Los índices para la recuperación de los casos se determinaron mediante criterio de experto. La base de casos se conforma con transmisiones de reductores diseñados y fabricados en la industria. La fase de recuperación se realiza combinando una consulta de selección y el algoritmo del vecino más cercano. Mediante la integración de la base de casos con un sistema CAD CAE (*Computer Aided Design, Computer Aided Engineering*) se obtiene un sistema basado en casos para el diseño de dichas transmisiones. Los nuevos diseños se realizan adaptando y comprobando el caso de mayor semejanza recuperado. Como la solución obtenida es similar a una transmisión existente, además del proceso de diseño, también se facilita la fabricación de las ruedas.

Palabras claves: razonamiento basado en casos, reductores de engranajes, diseño.

Abstract

The cylindrical external gear reducers have a wide application in the industry. The aim of this paper is to facilitate the design and production of these machines by means of the application of the artificial intelligence technique known as case based reasoning to the design of their transmissions. The indexes for case retrieval were determined by means of expert criteria. The case base was built with gear reducer transmissions that were designed and manufactured in the industry. The case retrieval is carried out through the combination of a selection query and the nearest neighbor algorithm. By means of the integration of the case base with a CAD CAE system was obtained a case based design system of this kind of transmissions. The new design is carried out by adapting and checking the closest case to the current transmission. As the obtained solution is similar to an existing transmission, besides the design process, is also facilitated wheel production.

Key word: case based reasoning, gear reducer, design.

1.Introducción

El razonamiento basado en casos es un paradigma de resolución de problemas que en muchos aspectos se diferencia de otras ramas de la inteligencia artificial. Mediante esta técnica un problema nuevo se soluciona recordando una situación previa similar y reutilizando su información y conocimiento. La mayoría de los autores coinciden en descomponer este proceso, en cuatro fases: recuperación, reuso, revisión y retención. La descripción inicial de la tarea a realizar define un nuevo problema. Este se utiliza en la recuperación de casos similares, del cual se toma uno para resolver el problema en cuestión. La solución obtenida se revisa y por último se retiene, mediante la incorporación del nuevo caso a la base de casos [1, 2].

En la actualidad, el razonamiento basado en casos se utiliza en la solución de tareas muy diversas. Se reportan aplicaciones en dominios tan distantes entre sí, como el arte culinario, la medicina el derecho y la ingeniería. En este sentido el diseño de engranajes no es la excepción. En la tabla 1 se resumen los principales sistemas referenciados en la literatura especializada, que utilizan el razonamiento basado en casos en esta actividad.

Tabla 1. Principales aplicaciones del razonamiento basado en casos al diseño de engranajes

Autor	País	Dominio
Bardasz [3]	USA	Transmisiones mecánicas
Becerra[4]	México	Transmisiones por engranajes interiores
Hu [5]	China	Transmisiones por engranajes cónicos
Moya [6]	Cuba	Transmisiones por tornillo sin fin
Aimin [7]	China	Reductores por engranajes cilíndricos

En un análisis de la información mostrada en la tabla 1 se aprecia que el diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior se aborda únicamente en el asistente para diseñadores mecánicos

DEJAVU, desarrollado en el año 1993 por Bardasz y Zeid [3]. Sin embargo, a criterio de este autor, el dominio demasiado amplio de esta aplicación, que incluye una variedad importante de transmisiones y elementos de máquinas, obliga a utilizar un modelo de memoria, que según los propios autores, [8] resultó en la práctica ineficiente.

Una aplicación, con un dominio notablemente próximo a las transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior, es el sistema basado en casos para el diseño de reductores desarrollado por Aimin [7]. Aquí, la base de casos contiene un grupo importante de diseños de estos equipos almacenados por partes. La recuperación se realiza a partir de los datos del nuevo problema: potencia, relación de transmisión, y velocidad. Se utiliza el algoritmo del vecino más cercano para definir el caso de mayor semejanza. El reductor recuperado se adapta a las nuevas condiciones de trabajo modificando las transmisiones por engranajes fundamentalmente. De esta forma, se aprecia que en esta aplicación, la recuperación está orientada al reductor y no a sus transmisiones como se pretende en esta investigación.

De esta manera se puede concluir, que en la literatura especializada no se reporta la utilización con éxito del razonamiento basado en casos, específicamente en el diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior para reductores.

La creciente popularización de los medios informáticos y su continua implantación en la sociedad ha facilitado significativamente la automatización del diseño de las transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior. Actualmente, esta actividad se realiza por medio de sistemas CAD CAE de reconocido prestigio que brindan soluciones satisfactorias en correspondencia a los requerimientos de las condiciones de explotación. Sin embargo, el conocimiento y la experiencia del especialista de engranajes continúa siendo un aspecto de vital importancia que influye decisivamente en la calidad del diseño.

De esta manera, se puede considerar el diseño de una transmisión por engranajes un recurso importante, que puede resultar aun más valioso, si se almacena y recupera de modo que sea posible su reutilización en nuevos reductores, ahorrando así, tiempo y dinero. En este sentido se utiliza en esta investigación la técnica de la inteligencia artificial conocida como razonamiento basado en casos, es decir, mediante su aplicación al diseño de las transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior se facilita el diseño de dichos reductores.

2. Materiales y métodos

La principal tarea de un sistema basado en casos es la recuperación de los casos apropiados basándose en la similitud entre el nuevo problema y los casos resueltos anteriormente. La fase de recuperación comienza con el nuevo problema y termina con la obtención del caso de mayor semejanza. Un caso se considera como el conjunto de información que abarca el planteamiento del problema y su solución [1, 2]. Una técnica ampliamente utilizada para la recuperación es el indexado de los casos que consiste en la selección de atributos lo suficientemente específicos como para usarlos de discriminante y lo suficientemente abstractos como para poder generalizar el caso. Por supuesto, también deben ser fáciles de obtener y de computar y su cantidad debe ser la menor posible ya que por cada característica indexada hay que realizar un cálculo de similitud, lo que disminuye la velocidad de la recuperación [2].

La selección de los índices, así como la determinación de su importancia relativa, en este trabajo, se realizó mediante criterio de experto (tabla 2). Las encuestas y entrevistas se realizaron a un total de 30 expertos, entre ellos, diseñadores de la industria, profesores de las asignaturas Diseño de Elementos de Máquinas y Resistencia de Materiales y otros ingenieros de experiencia. Se consultaron también criterios de la literatura [9].

Tabla 2. Importancia relativa de los índices

Nº	Indices	Importancia relativa (w)
1	Potencia que demanda la máquina (P)	1
2	Relación de engrane (Uz)	0.8
3	Velocidad de entrada (n ₁)*	0.7
4	Módulo (m)	1
5	Números de dientes de las ruedas (z ₁ , z ₂)*	0.7
6	Ángulo de inclinación de la hélice (B)	0.6
7	Distancia entre centros (a _w)	0.8
8	Dureza de las ruedas	0.9
9	Ancho de la rueda (b ₂)*	0.6
* El número 1 se refiere al piñón y el 2 a la rueda		

Entre las variables seleccionadas como índices se distinguen tres grupos:

1. Variables que constituyen datos iniciales cuando se realiza el diseño de una transmisión por engranajes para accionar una máquina determinada [9]: potencia, relación de engrane y velocidad de entrada.
2. Variables que definen las dimensiones de las ruedas: módulo, número de dientes, ángulo de inclinación del diente y distancia entre centros. Estas variables tienen gran importancia cuando se diseña una transmisión existente para su reposición, es decir, cuando se necesita descifrar los parámetros geométricos de una transmisión.
3. Variables que tienen una importancia significativa para la adaptación de las ruedas a condiciones de trabajo diferentes: ancho y dureza de las ruedas. Mediante la variación del ancho de las ruedas y su dureza se puede variar significativamente la capacidad de carga de una transmisión.

Con los índices establecidos y considerando la definición del caso dada anteriormente, se puede entender un caso, en este sistema basado en casos (figura 1), como la unidad de información que contiene los valores de los índices (planteamiento del problema) y los planos de las ruedas (solución).

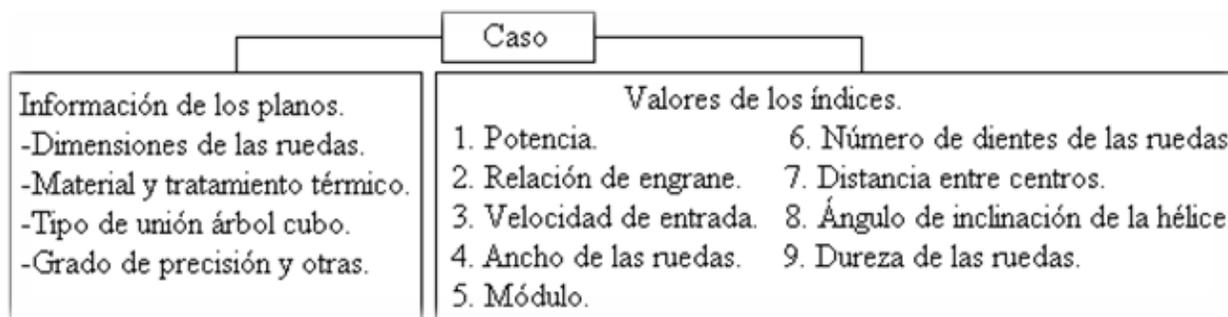


Fig. 1. Caso en el sistema basado en casos para el diseño de transmisiones por engranajes para reductores

Fuente: Elaboración del autor, 15 de noviembre de 2012.

La base de casos se conforma a partir de la información del archivo de diseño del departamento técnico de una fábrica de reductores. La misma se compone inicialmente por 48 transmisiones, diseñadas y fabricadas en esta industria. En la figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, como está representado el índice potencia en la base de casos.

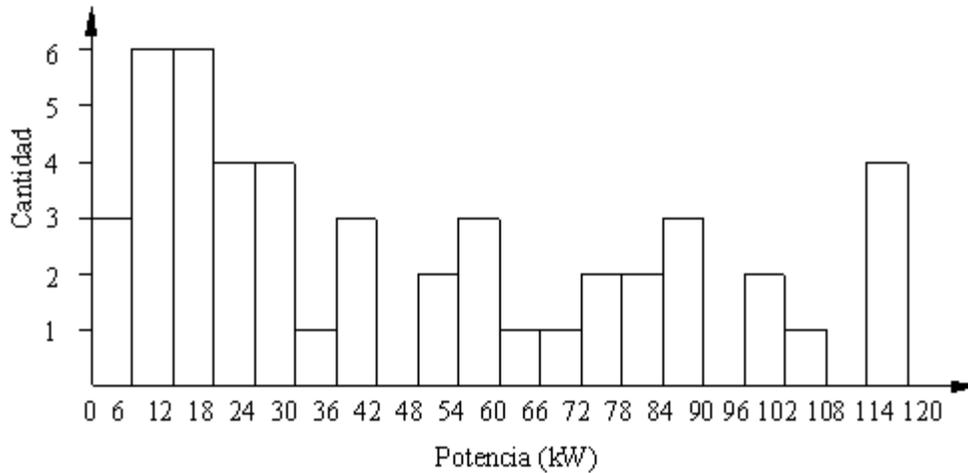


Fig. 2. Variación de la potencia en la base de casos

Fuente: Elaboración del autor, 20 de diciembre de 2012.

Para almacenar los casos se utiliza un Sistema de Gestión de Bases de Datos Relacionales (SGBDR). Las transmisiones se almacenan en tres tablas con relación uno a uno. Una tabla denominada “Piñones” que contiene la información de los piñones, otra llamada “Ruedas”, de igual estructura, con la información de las ruedas y una tercera denominada “Transmisión” donde se encuentra la información común a ambas ruedas.

En la figura 3 se muestra el modelo concebido en esta investigación para la automatización del sistema basado en casos para el diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior para reductores.

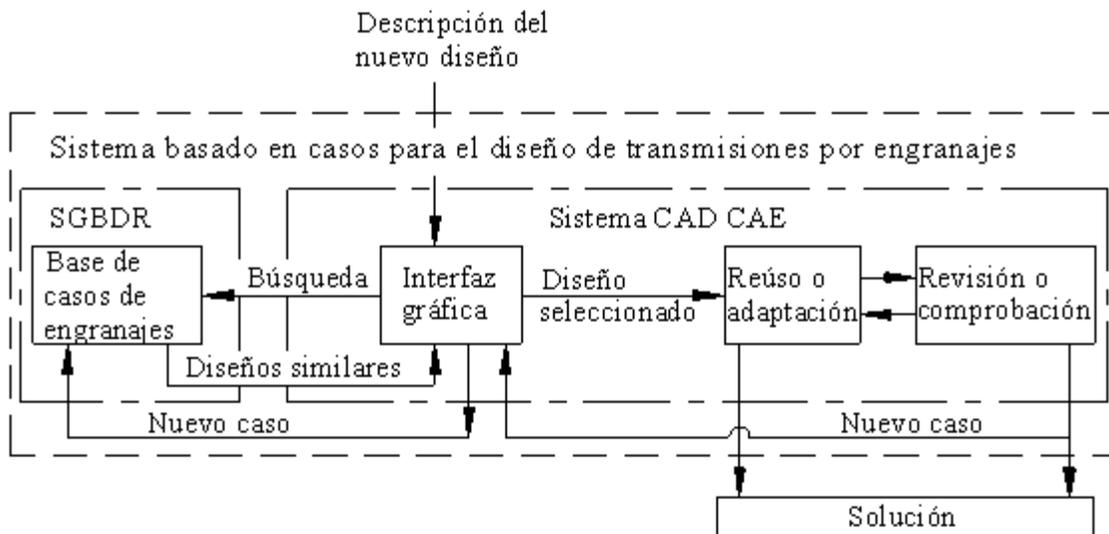


Fig. 3. Estructura general del modelo basado en casos desarrollado

Fuente: Elaboración del autor, 26 de enero de 2013.

Los valores de los índices, según sea el tipo de diseño que se realiza, constituyen la descripción del nuevo problema. Con ellos se realiza la búsqueda en la base de casos por medio de la interfaz gráfica programada dentro del sistema CAD CAE. Como sistema CAD CAE se utiliza un software que permite editar los planos de las transmisiones, así como la realización de las comprobaciones geométricas y de resistencia necesarias.

La recuperación de los casos se realiza en dos etapas. En la primera, mediante una consulta, se recupera un conjunto de posibles candidatos. Esta consulta ha sido concebida de manera que el valor de los índices

de los casos recuperados se encuentre dentro del intervalo:

(Valor del índice del nuevo problema) \pm (Porcentaje de aproximación)

El porcentaje de aproximación lo establece el diseñador de acuerdo a la tarea concreta que se realiza.

En la segunda etapa, mediante el algoritmo vecino más cercano, se establece un *ranking* de los casos de acuerdo al grado de semejanza calculado por la siguiente ecuación [2]:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N w_i * \delta_i(u_i, v)}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

Donde:

S: Semejanza entre el nuevo problema y el caso i de la base de casos.

w_i : Importancia relativa (tabla 1).

N: Cantidad de índices.

$\delta_i(u_i, v)$: Función de comparación por índices que se obtiene de la ecuación:

$$\delta_i(u_i, v) = 1 - \frac{|u_i - v|}{u_{\text{Máximo}} - u_{\text{Mínimo}}} \quad (2)$$

Donde:

u_i : Valor del índice del caso i en la base de casos.

v: Valor del índice en el nuevo problema.

$u_{\text{Máximo}}$: Valor máximo del índice en la base de casos.

$u_{\text{Mínimo}}$: Valor mínimo del índice en la base de casos.

La fase de recuperación finaliza con la obtención en la interfaz gráfica (figura 3) del conjunto de casos semejantes ordenados en forma descendente de acuerdo al valor de la función de semejanza calculado por la ecuación 1.

En la actualidad, en la mayoría de los sistemas basados en casos, se reutiliza la solución de mayor similitud sugerida por el sistema sin adaptación o se adapta manualmente [2]. Este es el caso de la mayoría de los sistemas basados en casos para el diseño de engranajes referenciados en la bibliografía [4, 6, 7] y también de este sistema. La fase de adaptación comienza con la revisión de los planos de la transmisión de mayor semejanza recuperada en el sistema CAD CAE (figura 3). El diseñador, al analizar estos planos, resuelve qué decisión tomar. Puede suceder cualquiera de las siguientes variantes:

·Una de las transmisiones recuperadas se puede utilizar sin realizar modificación alguna en el nuevo reductor.

·Ninguna de las transmisiones recuperadas se puede utilizar con o sin modificación en el nuevo reductor por lo que no queda otra opción que realizar un diseño completamente nuevo.

·Una de las transmisiones recuperadas se puede modificar para ser utilizada en el nuevo reductor. Esta modificación se realiza fundamentalmente sobre aquellas variables que no han sido seleccionadas como índices. Así, por ejemplo, la adaptación se puede realizar modificando:

vEl ancho de las ruedas.

vEl material de las ruedas, su tratamiento térmico, y como consecuencia, la dureza.

vLas dimensiones de los árboles y del cuerpo de las ruedas.

vLa posición de las ruedas respecto a los apoyos.

vLa vida útil.

vLos coeficientes de corrección.

vEl grado de precisión.

El nuevo diseño, obtenido a partir del caso modificado, se comprueba para verificar su geometría y

resistencia (fase de revisión) también en el sistema CAD CAE. Posteriormente, se almacena en la base de casos por medio de la interfaz gráfica (figura 3) para su utilización en la solución de nuevos diseños de reductores o sencillamente para su fabricación (fase de retención).

3. Resultados y discusión

En la figura 4 se muestra la interfaz gráfica que ha sido programado dentro del sistema CAD CAE.

Nuevo diseño

m: 0 mm a_w : 150 mm B : 0 ° U_z : 1.8 Potencia: 40 kW n_1 : 1300 rpm

Piñón: 0 Dureza: Rockwell min.....max: 0 0 b: 0

Rueda: 0 Dureza: Brinell min.....max: 0 0 b: 0

Base de casos de transmisiones de reductores Nº: 27 Semejanza: 0.988

m: 3 mm a_w : 150 mm B : 8.1094 ° U_z : 1.83 Potencia: 37.83 kW Torque: 289 Nm n_1 : 1250 rpm

Piñón: 35 Dureza: Brinell min.....max: 235 270 X: 0 b: 85

Rueda: 64 Dureza: Brinell min.....max: 170 210 X: 0 b: 60

Fig. 4. Interfaz gráfica.

Fuente: Elaboración del autor, 10 de febrero de 2013.

En la parte superior de la interfaz gráfica se define el nuevo problema. Las cajas de chequeo, al ser activadas, definen los índices que se tienen en cuenta para la ejecución de la consulta de selección.

Los parámetros geométricos que se utilizan como índices módulo, distancia entre centros, número de dientes de las ruedas y ángulo de inclinación de la hélice, han sido correlacionados mediante los contornos de bloqueo ya que no son independientes [10]. De esta manera se asegura, que durante el cálculo de la semejanza por la ecuación 1, no se tenga en cuenta una variable que resulte de la combinación de las demás.

En la tabla 3 se muestran las transmisiones recuperadas para el diseño de la transmisión por engranajes cilíndricos con contacto exterior de un reductor de un paso para las siguientes condiciones:

- Potencia que demanda la máquina movida en el árbol conducido del reductor 40,00 kW.
- Velocidad en el árbol de entrada 139,2 rad/s (1 330 rpm).
- Relación de transmisión necesaria 1,8.
- Se dispone, además, de una carcasa cuya distancia entre centros es 150 mm. La distancia entre los apoyos de los cojinetes de rodamiento es, aproximadamente, 133 mm.

Tabla 3. Casos recuperados

Nº	P (kW)	n1 (rpm)	uz	z1	z2	m (mm)	aw (mm)	b2 (mm)	b1 (mm)	Dureza		B (°)	Semejanza
										Piñón	Rueda		
27	37,83	1250	1,83	35	64	3	150	60	85	56 HRC	52 HRC	8,1094	0,988
7	18,20	1150	1,83	35	64	3	150	60	85	266 HB	266 HB	8,1094	0,978

Los datos introducidos en la interfaz gráfica para la recuperación de los casos se muestran en la figura 4. Se han activado las casillas de chequeo de los índices distancia entre centros y relación de transmisión. Para la distancia entre centros se ha seleccionado un porcentaje de aproximación igual a cero, según se exige de las condiciones del diseño. Para la relación de engrane se ha utilizado un porcentaje de aproximación igual a cinco. Como se observa en la tabla 3, la transmisión de mayor semejanza es la número 27. Al abrir el plano de las ruedas en el sistema CAD CAE se obtiene la siguiente información:

1. La transmisión pertenece al paso de alta de un reductor por engranajes cilíndricos de dos pasos.
2. El piñón se ha diseñado solidario con el árbol y colocado de forma asimétrica respecto a los apoyos.
3. El material del piñón es acero 42CrMo4, bonificado, endurecido por inducción con dureza de 56 HRC.
4. El material de la rueda es acero 34CrNiMo6, bonificado, endurecido por inducción con dureza de 52 HRC.
5. El grado de precisión es ocho.
6. La unión árbol-cubo es con chavetas prismáticas.
7. Dimensiones de las ruedas.

La adaptación se reduce, entonces, a modificar el árbol del piñón, de manera que este último quede colocado de forma simétrica respecto a los apoyos y que la distancia entre estos sea 133 mm (figura 5). La rueda no se modifica.

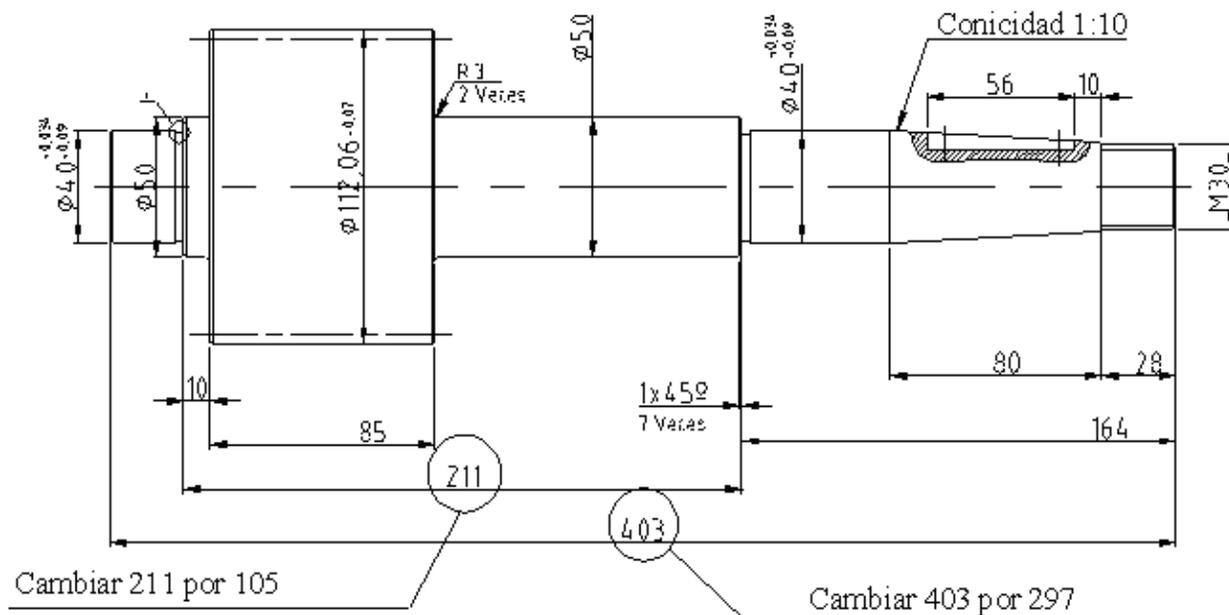


Fig. 5. Adaptación del árbol del piñón

La nueva transmisión obtenida se verifica en el sistema CAD CAE para comprobar su resistencia a la fatiga superficial y a la fatiga volumétrica (tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la comprobación de la transmisión adaptada

Fuente: Elaboración del autor, 22 de febrero de 2013.

Falla	Factor de seguridad	
	Piñón	Rueda
Fatiga por flexión volumétrica	2,69	2,47
Fatiga superficial	1,32	1,30

Como la rueda no se modificó y el diseño del piñón es similar a uno existente el proceso de fabricación también lo es. Es decir, se utilizan la misma tecnología, máquinas herramienta, herramientas de corte y dispositivos. De esta forma, el uso del razonamiento basado en casos en este ejemplo facilita la preparación tecnológica de fabricación de las ruedas.

4. Conclusiones

La aplicación del razonamiento basado en casos al diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior para reductores permite la reutilización de soluciones realizadas y validadas anteriormente en nuevos reductores. Es decir, se posibilita el empleo de una misma transmisión, con o sin modificación, en diferentes reductores, lo que facilita la preparación tecnológica de fabricación de las ruedas, hace más sencillo el proceso de diseño, y también ayuda a la disponibilidad de piezas de repuesto.

5. Referencias

- [1] Aamodt, A. Plaza, E. “Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches.” *AI Communications* 1994 vol. 7, n°1, p. 39-59. [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://home.cc.gatech.edu/ccl/uploads/45/aug-28-Aamodt-Plaza-94.pdf> ISSN:0921-7126
- [2] Uddin, M. A Begum, S. Olsson, E. Xiong, N. Funk, P. *Case-Based Reasoning for Medical and Industrial Decision Support Systems.*: Springer-Verlag Germany 2010, 52 p. p. 7- 52. [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://www.mrtc.mdh.se/publications/2126.pdf> ISBN 978-3-642-14077-8
- [3] Bardasz, T. Zeid, I. “DEJAVU: Case-based reasoning for mechanical design” *Artificial Intelligence for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing* 1993 Vol. 7, N°2, p. 111-124 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=4197328> ISSN 0890-0604
- [4] Becerra, A. M. Moya, J. L. Chagoyen, C. A. Moreno, D. A. Velazquez, J. A. Rivera, V. B. “Aplicaciones de los Sistemas Basados en el Conocimiento al Diseño y Descifrado de Reductores de Ciclo para la Industria Azucarera” *Centro Azúcar* 2007, N° 2 p.1-8 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://centrozucar.qf.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2007/2/4.pdf> ISSN: 2223-4861
- [5] Hu, C. Zhao, D. Chen, X. “Knowledge Base System of Spiral Bevel Gear Based On Design Tree” *Advanced Materials Research*. 2012 vol. 472 - 475, p. 1739-1743 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://www.scientific.net/AMR.472-475.1739> ISSN 1662-8985
- [6] Moya, J. L. Becerra, A. M. Cesar, A. C. “Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sin fin” *Ingeniería Mecánica*. 2012, vol. 15, n°1, p. 1-9 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=1815-594420120001&nrm=iso&lng=pt ISSN 1815-5944
- [7] Aimin, J. Quansheng, H. Huanmin, X. Zhengming, C. “Design System Of The Two-Step Gear Re-

ducer On Case-Based Reasoning” *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 2009, vol. 22, nº 5, p.671-679 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: http://caod.oriprobe.com/articles/17370940/design_system_of_the_two_step_gear_reducer_on_case.htm ISSN 1000-9345.

[8] Zeid, I. Chinnappa, C. G. “An optimized and enhanced cognitive memory model for mechanical design problems” *Knowledge-Based Systems* 1998 Vol. 11, Nº 3, p.197–211 [Consultado el 5 de febrero 2013]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095070519800046X> ISSN 0950-7051

[9] Budynas”Nisbett Shigley’s *Mechanical Engineering Design* Eighth Edition EEUU: McGraw-Hill 2008 p.652-758. ISBN: 0-390-76487-6

[10] Hernández-Ortega, R. Chagoyén Méndez, C. A. Fernández-Castañeda, F. Moya-Laureano, J. “Correlación automatizada de parámetros geométricos mediante contornos de bloqueo en engranajes cilíndricos con contacto exterior” *Ingeniería Mecánica*. 2013, Vol. 16, Nº 1, p. 72-82 [Consultado el 25 de febrero 2013]. Disponible en:

<http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim>, ISSN 1815-5944