ON THE REVERSE ENGINEERING AND ENGINEERING EDUCATION IN GENERAL

Luis Andrés García Velásquez[1], Eusebio Jiménez López[2], Saúl Ontiveros Moroyoqui[3], Gabriel Luna Sandoval[4], Luis Reyes Ávila[5], Víctor Manuel Martínez Molina[6], Juan Delfín Vázquez[7] y Leonardo Arellano Rivera[8]

Abstract — *Reverse Engineering is a methodology that must be teached to the future engineers in a systematic way because a great deal of the activities developed in the industry are related with it. In this article a method to carry out reverse engineering is presented, this can be used by any engineer in a wide field of applications; such method is made of thirteen steps and has been very successful in engineering's teaching experience. A simple application of the method is exposed to illustrate its usefulness, the problem is to duplicate a mechanical model and implies the use of CAD/CAM computational tools. Some teaching experiences are discussed together with others in research obtained from the application of the described method to the analysis of practical cases.*

Index Terms— *Reverse Engineering, Engineering Teaching, CAD/CAM introduccion*

La Ingeniería inversa es el proceso que se sigue para obtener un duplicado de un objeto de referencia [1]. Por otro lado, de acuerdo con [2], gran parte de la Ingeniería que se realiza en México es hecha mediante el uso de una o varias de las técnicas de la Ingeniería Inversa. Sin embargo, generalmente la Ingeniería Inversa se realiza en forma tradicional o empírica lo cual hace que las piezas duplicadas o las máquinas reproducidas sean más costosas o, en su caso, se duplican mal.

De acuerdo con [3], la reproducción de partes y componentes es una necesidad actual de las industrias, pues, por un lado, no siempre se tienen las partes para las reparaciones o para el mantenimiento urgente de la maquinaria y se tiene la necesidad de reproducir dichas partes y, por otro lado, la innovación tecnológica basada en mejoras de productos ya existentes, exige el uso de la Ingeniería Inversa para conocer sistemáticamente los productos a ser mejorados.

Por otro lado, para lograr desarrollar proyectos de Ingeniería Inversa de manera eficiente y con gran potencial, es necesario contar con instrumentos de medición, métodos de análisis, personal calificado y un sistema de proveedores, tanto de servicios técnicos, como proveedores de partes y componentes. En otras palabras, se requiere de todo un sistema técnico bien organizado y especializado para realizar la ingeniería inversa. Además, es necesario entender que la Ingeniería Inversa es un método legítimo para conocer partes y componentes y no es sinónimo de piratería. El método es legítimo desde el contexto de la investigación, la enseñanza y las innovaciones tecnológicas, puesto que es una manera de conocer y sistematizar información acerca de los componentes. Una prueba de ello es la información que se requiere para los programas de mantenimiento de las máquinas en un sistema productivo. La Ingeniería Inversa debe ser enseñada en las Universidades, puesto que gran parte de las actividades que hace la ingeniería es precisamente conocer partes y componentes, máquinas o sistemas. Los alumnos deben ser capaces de entender muchas de las actividades que se realizan en las empresas desde el contexto de la Ingeniería Inversa y deben ser entrenados en los laboratorios de las Universidades.

En este contexto la Universidad La Salle, localizada en Cd. Obregón, Sonora, México, cuenta con taller de tecnologías y varios laboratorios especializados en Ingeniería Inversa [4]. Cuenta con profesores especializados en varios campos del conocimiento y alumnos que desarrollan tesis y proyectos de clase, ha firmado convenios con empresas y otras universidades [5] y genera proyectos para las PYMES [6].

1 Luis Andrés García Velázquez, Universidad La Salle Noroeste, Calle Veracruz S/N, Fracc. Obregón Norte, Cd. Obregón, Sonora, CP 85019.Tel: (6444106000). México, lgarcia@ulsa-noroeste.edu.mx
2 Eusebio Jiménez López, Innovación en Ingeniería de Manufactura y Mantenimiento S de RL MI (Empresa tipo SPIN – OFF de la RED ALFA).Cd. Obregón Sonora, México, ejimenezl@msn.com
3 Saúl Ontiveros Moroyoqui, Universidad Tecnológica de Nogales, Nogales Sonora, México, sare9825@hotmail.com
4 Gabriel Luna Sandoval, CESUES SLRC, SLRC, Sonora, México, gabrielluna@hotmail.com
5 Luis Reyes Ávila, Instituto Mexicano del Transporte. San Fandila Querétaro, México, lreyesa@imt.mx
6 Víctor Manuel Martínez Molina, CINNTRA de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora, Cd. Obregón Sonora, México, servihidraulica@hotmail.mx
7 Juan Delfín Vázquez, CETA del Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Cd. Obregón Sonora, México, jdelfin@itesca.edu.mx
8 Leonardo Arellano Rivera, Innovación en Ingeniería de Manufactura y Mantenimiento S de RL MI (Empresa tipo SPIN – OFF de la REDALFA). Cd. Obregón Sonora, México, leo_ar_1985@hotmail.com.

Este artículo se presenta un método para realizar la Ingeniería Inversa de partes y componentes, así como la experiencia que se ha obtenido en la enseñanza de dicho método en la Universidad la Salle Noroeste y en las Universidades que conforman la RED ALFA [5]. Se presenta un caso de estudio para mostrar la aplicación del método en el duplicado de un componente didáctico.

LA INGENIERÍA INVERSA: CONCEPTOS

La Ingeniería Inversa no tiene una definición única, varía de acuerdo con cada propuesta de los investigadores. Por ello, es necesario seleccionar una definición y relacionarla con su metodología. De acuerdo con [1], se tiene la siguiente definición:

La Ingeniería Inversa es un proceso analítico-sintético que busca determinar las características y/o funciones de un sistema, una máquina o un producto o una parte de un componente o un subsistema. El propósito de la ingeniería inversa (I.I) es determinar un modelo genérico de un objeto o producto o sistema de referencia.

O, en forma equivalente:

La Ingeniería Inversa puede también considerarse como un proceso de sistematización; esto es, un proceso que pone de manifiesto o explícita las relaciones objetivas entre los elementos y las relaciones que hacen posible la existencia de un objeto, para posteriormente construir un modelo de dicho objeto.

También,

La Ingeniería Inversa busca obtener información acerca de un objeto o sistema de referencia. Dicha información es obtenida bajo un proceso de análisis del objeto, y puesto que todo análisis hecho por la I.I debe ser guiado, entonces la información obtenida debe ser específica con dos claros propósitos; esto es, por un lado la información es referida al objeto inicial o de referencia o mejor dicho, debe caracterizar al objeto y, por otro lado, la información guía a la síntesis hacia la obtención de un modelo del objeto.

Algunas propiedades del objeto de referencia A y el objeto reproducido B son las siguientes [1,2]:

"A puede ser un objeto real o virtual. Es real si es un objeto físico y con propiedades físicas, químicas, eléctricas, etc. Es virtual si dicho objeto no es físico. El objeto de referencia puede ser un objeto o parte de un objeto o sistema o subsistema y se clasifica también en completo o incompleto. Es completo sí dada una referencia el objeto A satisface todas las características de la referencia y es incompleto si cuando menos una de tales características no cumple con la referencia. El objeto A es también finito, medible y admite descomposición".

Por otro lado, la naturaleza del objeto reproducido B es la siguiente:

"B puede ser real o virtual, objeto o parte del objeto o sistema o subsistema. Por naturaleza el objeto reproducido B es completo dada la referencia. B siempre es un modelo de A".

En forma simplificada, la Ingeniería Inversa se encarga de usar programas de investigación para conocer, en forma sistemática, un objeto de referencia. Se trata de obtener información acerca de productos usando programas y herramientas.

Por otro lado, como todo proceso de investigación, la Ingeniería Inversa tiene una metodología. De acuerdo con [2], la definición descrita anteriormente tiene asociada las siguientes fases:

1) Fase 1: Conocimiento preliminar del objeto de referencia A.
2) Fase 2: Diseño de un plan de investigación P.
3) Fase 3: Aplicación del plan al objeto de referencia.
4) Fase 4: Sintetizar la información generada por el plan, generar el modelo B y demostrar que B ~ A.
5) Fase 5: Caracterizar el modelo B.
6) Fase 6: Usar B para diversos propósitos.

El término B ~ A significa equivalencia entre el modelo obtenido y el objeto de referencia. El método de la Ingeniería Inversa propuesto en [1], también puede explicitarse en pasos. Dichos pasos serán descritos durante la ejemplificación del caso de estudio en la sección siguiente.

CASO DE ESTUDIO

En esta sección se presenta la aplicación de las fases descritas anteriormente a un caso de estudio. Se expondrán 13 pasos equivalentes a dichas fases. Esto es:

1) Se presenta el objeto de referencia A.

FIGURA. 1
PIEZA A DUPLICAR

Descripción: A es un objeto real y es un componente, es finito y medible, y se considera que admite descomposición en el sentido de ser analizado subparte por subparte (circunferencias, arcos, superficies entre otras subpartes).

2) Se definen las referencias

El objeto de referencia A mostrado en la figura 1 es de la clase: Extenso Contenido Referencial (ECR). Esto es, la pieza es ciertamente conocida y se tienen métodos de análisis ya desarrollados entre otras cosas, por ello A $\in$ *ECR.*

3) Se definen los objetivos

El objetivo principal es generar 4 modelos de A:

- *Modelo de medición*
- *Modelos en CAD*
- *Modelos en CAM*
- *Modelo de fabricación en CNC*

4) Con los pasos 2 y 3, se diseña el proceso de la investigación.

Son 4 programas principales los que se aplicarán:

- *Programa 1: Obtener el modelo de las medidas usando una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC).*
- *Programa 2: Obtener el modelo CAD a partir de los datos del programa 1.*
- *Programa 3: Obtener el modelo CAM a partir de la información del programa 2.*
- *Programa 3: Obtener el duplicado por proceso de fabricación en CNC.*

5) El producto del diseño del paso 4) es un plan o programa (P) de investigación operativa.

6) Se aplica P al objeto A.

Por razones de espacio solo se pondrán los resultados de los programas. La tabla 1 muestra los resultados del programa 1, las mediciones se realizaron en la MMC de la ULSA Noroeste. La figura 2 muestra el modelo en CAD hecho en Autocad de la pieza de trabajo y la figura 3 muestra el modelo hecho en Mastercam.

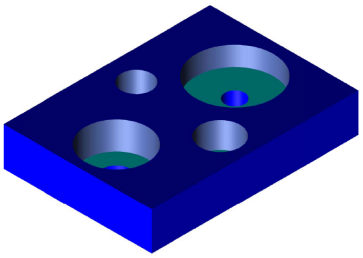

FIGURA. 2
MODELO EN CAD

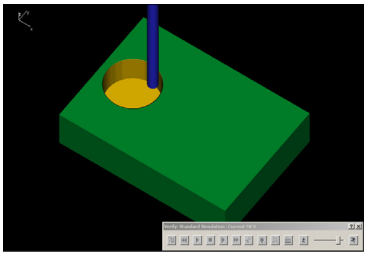

FIGURA. 3
MODELO EN CAM

La figura 4 muestra el modelo fabricado en una máquina CNC Boxford de la UTS.

FIGURA. 4
MODELO B (DUPLICADO FÍSICO)

7) El resultado del paso 6) es información de A.

8) Se considera el paso 3) y con los resultados del paso 7) se genera B.

9) B es un modelo.

10) Se verifica, según el paso 3) si B es equivalente a A.

Para determinar que el objeto B es un modelo representativo de A, se deben realizar diversas pruebas a B, tales como aplicar programas de medidas, o pruebas de rugosidad etc. Para efectos de este artículo se considerará que en efecto,

$$B \sim A$$

11) Se dan las conclusiones.

Una conclusión es que el duplicado es satisfactorio en el sentido de que fue desarrollado para fines didácticos.

12) Se revalúa B.

B y sus modelos asociados (Modelo de mediciones, Modelo CAD y modelo CAM) son útiles para muchas aplicaciones, entre ellas para la enseñanza de la Ingeniería Inversa.

13) B es aplicable.

El duplicado B tiene diversas aplicaciones, entre ellas para sistematizar el proceso de fabricación de la pieza para fines didácticos.

EXPERIENCIA EN INGENIERÍA INVERSA DE LA RED ALFA

El proceso de la Ingeniería Inversa, para ser funcional y efectivo, tanto en el ámbito de la enseñanza, como el industrial, requiere de grupos multidisciplinarios y de organizaciones formales. En este sentido en Cd. Obregón Sonora, en el año de 2005 se formó la RED ALFA la cual está compuesta por la Universidad La Salle Noroeste (ULSA), el Instituto Tecnológico Superior de Cajeme (ITESCA), la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora (UTS) y la Empresa Impulsora de Desarrollo Dinámico S.A. de C.V., ahora llamada Innovación en Ingeniería de Manufactura y Mantenimiento S DE RL MI (IIMM). Dentro de las líneas de investigación de la RED se encuentra el tema de la Ingeniería Inversa. La infraestructura con la que cuentan las organizaciones de la RED, da soporte para la

enseñanza y las aplicaciones industriales de la Ingeniería Inversa.

La ULSA y la UTS cuentan con laboratorios de Metrología Avanzada los cuales tienen cada uno, una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC). El ITESCA cuenta con equipo para hacer mediciones de esfuerzos y deformaciones a piezas mecánicas. Todas las Instituciones educativas cuentan con equipos de fabricación convencional y máquinas de control numérico, así como software licenciado para la Ingeniería Inversa tales como el AUTOCAD, NX, GEOMET, entre otros. A la fecha la línea de investigación ha generado 5 tesis de posgrado, 10 tesis de licenciatura, 4 informes técnicos y 5 artículos en congresos. Se ha brindado capacitación en Ingeniería Inversa a empresas y centros de estudios de la región.

En la ULSA se forma y se entrena a los alumnos en Ingeniería Inversa de partes y componentes en la carrera de Mecatrónica, particularmente en los tópicos y en la materia de Análisis de Sistemas Mecatrónicos. Se trabaja en Ingeniería Inversa Automatizada e Ingeniería Inversa Tradicional. Se les enseña a diseñar y ejecutar programas de la Ingeniería Inversa en forma particular o integrada. En los programas de metrología se les indica la importancia de la calibración en los instrumentos usados y de las mediciones normadas, así como la gran importancia que tienen el uso de métodos de medición formales tradicionales y automatizados. Se les señala que para los casos de la Ingeniería Inversa Automatizada, se deben conocer los diferentes protocolos que existen para la representación y el intercambio de información entre los diferentes paquetes computacionales, pues es sabido que los alumnos se vuelven usuarios del software y prestan poca importancia a los aspectos coyunturales de las integraciones CAD/CAM/CAE. También se enseñanza en las Universidades que conforman la RED ALFA, las implicaciones negativas que se derivan del mal uso de la información obtenida de la Ingeniería Inversa y de la violación de patentes.

Finalmente, considerando que la Ingeniería Inversa tiene que ser explotada industrialmente y que para ello se requiere de organizaciones formales, actualmente se está formado, en el Estado de Sonora, México, una Red Estatal PYME para la Innovación y la Transferencia Tecnológica (La Red Regional del Noroeste ya ha sido firmada).

CONCLUSIONES

En este artículo se ha descrito una definición y un método asociado con el proceso de la Ingeniería Inversa de partes y componentes, y se ha discutido la experiencia de la enseñanza en dicho proceso en las Universidades que conforman la RED ALFA. Los resultados obtenidos se resumen en los puntos siguientes:

- El método de la Ingeniería Inversa propuesto en este artículo, es útil para la enseñanza de la Ingeniería, pues permite sistematizar el proceso del duplicado de partes y componentes.
- El método puede ser usado para múltiples aplicaciones, por ejemplo para guiar la Ingeniería Inversa de elementos complejos de máquinas, para obtener esfuerzos y deformaciones en estructuras, etc.
- Es necesario que se tome en cuenta una definición de la Ingeniería Inversa de las muchas que existen y considerar su método asociado.
- El centro medular de la Ingeniería Inversa es el diseño de los programas de investigación. La correcta planeación de los mismos conducirá a tener información confiable y representativa del objeto de referencia.
- Para explotar industrialmente la Ingeniería Inversa, es necesario formar redes multidisciplinarias entre empresas y universidades, pues por lo general un solo organismo no cuenta con toda la infraestructura requerida para ejecutar programas especializados de la Ingeniería Inversa.

REFERENCIAS

[1] JIMENÉZ Eusebio, REYES Luis, GARCÍA Andrés: *Algunas consideraciones sobre la Ingeniería Inversa*, Informe Interno de Investigación, Centro de Tecnología Avanzada de ITESCA, Red Alfa, Sonora, México, 2006, ISBN: 970-9895-12-5.

[2] JIMENÉZ Eusebio, REYES Luis, GARCÍA Andrés; MONTOYA Norberto, MARTÍNEZ Víctor, SOTO Esteban, LUNA Gabriel, ONTIVEROS Saúl: *Algunas consideraciones epistemológicas sobre la ingeniería inversa*, Memorias del XIII congreso internacional anual de la SOMIM y congreso internacional de metal mecánica 2007, Durango, México, 2007.

[3] ARELLANO Leonardo. Fabricación automatizada y pruebas dimensionales de una pieza mecánica para justificar un método de la ingeniería inversa. Tesis de Licenciatura en Mecatrónica. Universidad La Salle Noroeste. (2008).

[4] http://www.ulsa-noroeste.edu.mx/ser_taller_mc.asp.

[5] JIMENÉZ Eusebio, REYES Luis, SOTO Esteban, GALINDO Francisco, OCHOA Francisco, MARTÍNEZ Víctor. Experiencias de las relaciones industria-universidad en la región Sur de Sonora, México: el Caso de la RED ALFA, Memorias del XIV congreso internacional anual de la SOMIM y congreso internacional de metal mecánica 2008, Puebla, México, 2008.

[6] NUÑEZ E, MARTÍNEZ V, MARTÍNEZ A, JIMÉNEZ E, CHÁVEZ E, BORBOA A. *Sistema de control para dispositivo Semi-automático de pesado y dosificado de totopos*. Memorias de XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, del 23 al 25 septiembre de 2009, Cd. Obregón Sonora, México.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a las organizaciones que conforman la RED ALFA, a la Empresa IIMM, al CESUES de SLRC, a la Universidad Tecnológica de Nogales y al Instituto Mexicano del Transporte, por el apoyo prestado para desarrollar la presente investigación.

Promedio

Tabla de Medida (mm)

Cota ScanMAX	Primer medición	Segunda medición	Tercer medición	Promedio
a	105,3481	105,356	105,3232	**105,3424**
b	75,0511	75,051	75,0453	**75,0491**
c	19,8528	19,8526	19,8425	**19,8493**
ΦCirculo1	10,0494	10,0621	10,0625	**10,0580**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo2	8,0688	8,0467	8,0667	**8,0607**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo3	14,0643	14,0641	14,0685	**14,0656**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo4	8,0593	8,0574	8,0713	**8,0627**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo5	39,232	39,2433	39,2334	**39,2362**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo6	20,1369	20,1445	20,135	**20,1388**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo7	31,5244	31,5239	31,5262	**31,5248**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
ΦCirculo8	15,4126	15,4186	15,4198	**15,4170**
	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1

Cota ScanMAX	Primer medición	Segunda medición	Tercer medición	Promedio
Circulo 1				
x	0	0	0	0,0000
y	0	0	0	0,0000
z	0	0	0	0,0000
Circulo 2				
x	32,6586	32,6611	32,663	**32,6609**
y	23,1704	23,1862	23,1829	**23,1798**
z	0	0	0	**0,0000**
Circulo 3				
x	60,2587	60,2682	60,2761	**60,2677**
y	0,0295	0,0535	0,0451	**0,0427**
z	0	0	0	**0,0000**
Circulo 4				
x	30,0798	30,103	30,0935	**30,0921**
y	-22,3378	-22,3231	0,043667	**-14,8724**
z	0	0	0	**0,0000**
Circulo 5				
x	-0,0331	-0,0148	-0,0217	**-0,0232**
y	0,0091	0,0092	0,009	**0,0091**
z	8,5782	8,5801	8,5815	**8,5799**
Circulo 6				
x	32,6483	32,6446	32,6447	**32,6459**
y	23,1658	23,1763	23,1759	**23,1727**
z	6,7801	6,7815	6,7812	**6,7809**
Circulo 7				
x	60,2476	60,266	60,2664	**60,2600**
y	0,0257	0,052	0,0451	**0,0409**
z	5,4661	5,4596	5,4633	**5,4630**
Circulo 8				
x	30,0597	30,0913	30,087	**30,0793**
y	-22,3299	-22,3234	-22,3257	**-22,3263**
z	6,5149	6,5022	6,5077	**6,5083**
Rectangulo				
x	30,1647	30,196	30,2194	**30,1934**
y	-0,0221	-0,016	-0,013	**-0,0170**
z	0	0	0	**0,0000**

TABLA 1

MEDICIONES DE LA PIEZA EN UNA MMC SCAN MAX