



# Propuestas Tecnológicas de Autocorrección de ejercicios de modelado 3D

## Technological Proposals for self-assessment of 3D modelling exercises

Laura García-Ruesgas <sup>1</sup>, Francisco Valderrama-Gual <sup>1</sup>, Cristina Torrecillas <sup>1</sup>, Amparo Verdú-Vázquez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Sevilla: Departamento de Ingeniería Gráfica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid: Departamento de Tecnología de la Edificación, Escuela Técnica Superior de Edificación.

Recibido: 10/03/2020 | Aceptado: 28/05/2020 | Fecha de publicación: 31/08/2020  
DOI:10.20868/abe.2020.2.4463

### RESUMEN

En la actualidad, existen varios procedimientos contrastados y algunas otras propuestas [1] para realizar la autoevaluación de ejercicios o exámenes de materias que se evalúan mediante ejercicios numéricos. Se comparan los valores intermedios o finales y se asigna una calificación automática de autoevaluación. Este procedimiento clásico de corrección por parte del profesor se puede ampliar [2]. La evaluación automática de los ejercicios basados en textos resulta más complicada porque, aunque la apariencia de ciertas palabras clave o sus sinónimos podría ofrecer un posible acercamiento a la evaluación mecánica de esos ejercicios, la dificultad en la evaluación de éstos reside en la interpretación de su significado [3].

En el caso de los ejercicios gráficos en 2D, que son típicos del dibujo técnico, el problema es muy diferente, ya que no hay cadenas alfanuméricas para comparar. Las similitudes entre las imágenes y la comparación de entidades primitivas (objetos vectoriales) pueden ser posibles formas de evaluación [4]. El problema resulta más complicado cuando queremos evaluar mecánicamente los modelos 3D.

En este artículo se presenta una compilación de posibles procedimientos a utilizar en la generación de una herramienta de autoevaluación para ejercicios de modelización industrial de sólidos, es decir, de piezas mecánicas [5]. En estos casos, ciertos parámetros como los volúmenes, las superficies, los centros de gravedad o los momentos de inercia pueden ser una primera aproximación a sus correcciones [6]. Estas evaluaciones podrían continuar con el análisis de las operaciones constructivas que existen en la modelización del objeto, tales como piezas sólidas, vaciados, agujeros, roscados, etc., todas ellas incluidas en sus árboles de modelización o listas de operaciones. La generación de una utilidad que ayude a la corrección de los ejercicios de modelización 3D sería de gran interés, ya que aportaría eficacia y agilidad al proceso de evaluación, así como una mayor objetividad al utilizar un sistema informático que aísla los factores de similitud y aplica automáticamente reglas de evaluación mensurables.

**Palabras clave:** Metodologías de evaluación, estrategias de corrección, evaluación automática, modelización sólida.

## **ABSTRACT**

---

Nowadays, there are several contrasted procedures and other proposals [1] for the self-assessment of exercises or exams of subjects which are evaluated using numerical exercises. Intermediate or final values are compared, and an automatic qualification of self-assessment is assigned. It is possible to extend this classic correction procedure by the teacher [2]. The automatic assessment of exercises based on texts is more complicated because the appearance of certain keywords or their synonyms could offer a possible approach as a mechanical assessment of those exercises. However, the difficulty in the assessment of these exercises is the interpretation of their meaning [3].

In the case of 2D graphic exercises, which are typical of technical drawing, the problem is very different, since there are no alphanumeric chains to compare. Similarities between images and the comparison of primitive entities (vector objects) may be possible ways for evaluation [4]. The problem is more complicated when we want to evaluate 3D models mechanically.

This article presents a compilation of possible procedures to use in the generation of a self-assessment tool for industrial solid modelling exercises, that is, of mechanical parts [5]. In these cases, certain parameters such as volumes, surfaces, centres of gravity or moments of inertia can be a first approximation to their corrections [6]. These evaluations could continue with the analysis of the constructive operations that exist in the modelling of the object, such as solid parts, emptying, holes, threading, etc., all of them included in their modelling trees or lists of operations. The generation of a utility that helps in the correction of 3D modelling exercises would be of great interest, since it would bring effectiveness and agility to the evaluation process, as well as greater objectivity when using a computer system that isolates similarity factors and implements rules of measurable evaluation automatically.

**Keywords:** *Evaluation methodologies, correction strategies, automatic assessment, solid modelling.*

## 1. INTRODUCCIÓN

¿Qué docente no estaría encantado con la corrección automatizada de sus exámenes o con la posible autoevaluación que pudieran realizar los alumnos sobre los mismos? El ahorro de tiempo en estas actividades indudablemente podría dedicarse a mejorar el aspecto de los contenidos de aprendizaje. Esta tarea, evidentemente ya ha sido abordada por algunos docentes y, abarcada principalmente con el empleo de test con respuestas predefinidas o problemas con soluciones cerradas que solo valoran el resultado total o parcial, sin tener en cuenta la metodología empleada [6], [7], [8].

Existen otras opciones más complejas para evaluar las respuestas de tipo texto, como puede ser la búsqueda de palabras clave, aunque la dificultad en la corrección de esos ejercicios radica en la interpretación de su significado. Este tipo de evaluación suele aplicarse en ejercicios o exámenes realizados online [9]. Con el objeto de aumentar la efectividad en la evaluación y conseguir un mejor rendimiento, hay aplicaciones que permiten generar hojas de test con múltiples criterios. Éstas emplean técnicas de agrupación y programación dinámica, permitiendo así la construcción de hojas de test acordes con los requisitos especificados previamente [10].

Por otro lado, cuando la evaluación de los resultados del aprendizaje requiere considerar la aplicación del conocimiento en un contexto específico, las tareas basadas en test se suelen sustituir por técnicas de evaluación basadas en el rendimiento [11], [12].

Pero cuando el ejercicio a valorar no requiere una respuesta de tipo numérico o alfanumérico, por ejemplo en el caso de ejercicios gráficos, el problema es muy distinto. En [13] por ejemplo, se muestra un algoritmo diseñado para la

creación y verificación automática de ejercicios de geometría junto con una herramienta de software basada en el mismo. El algoritmo compara dinámicamente las distancias entre los objetos geométricos de la solución del alumno y la solución de la plantilla. Si las soluciones de ambos son equivalentes, entonces se considera correcta la solución del alumno. Por otro lado, en [14] se presenta una plataforma de software interactiva para el autoaprendizaje y autoevaluación en sistemas de control automático. La mayoría de estos métodos de evaluación emplean gráficos por computador y técnicas multimedia para aumentar la capacidad de comunicación [15]. También se están utilizando aplicaciones de técnicas de gráficos por computador cada vez más potentes, como pueden ser la realidad virtual y aumentada, para construir laboratorios virtuales efectivos y poder mejorar todavía más la experiencia de aprendizaje a través de los tutores virtuales [16], [17]. Sin embargo, pese a la gran difusión de estas técnicas en el contexto educativo, la realidad es que son escasos los trabajos publicados que se centran en la evaluación automática de los resultados de los cursos relacionados con los gráficos por computador.

Las similitudes entre imágenes y la comparación de entidades primitivas (objetos vectoriales) pueden ser vías posibles para una evaluación. Concretamente, en [18] se presenta un conjunto de métodos para autoevaluar imágenes de Photoshop y animaciones Flash, que incluye sistemas de indicadores de niveles múltiples y estrategias de evaluación de correspondencia difusa para tareas multimedia. El sistema considera tanto el contenido del archivo electrónico como el registro de las operaciones del estudiante, extrayendo información técnica como el tamaño de la imagen, de la fuente o el número de capas, entre otros. La evaluación se realiza ejecutando un algoritmo de coincidencia

basado en lógica difusa contra una referencia en forma de texto.

Dentro del ámbito del dibujo en ingeniería y el diseño asistido por computador se ha investigado también la evaluación empleando el uso del ordenador. En [3] se propone una herramienta de evaluación totalmente automática, diseñada para un curso de modelado 3D, en el que los estudiantes demuestran su capacidad para modelar escenas estáticas utilizando el modelador de código abierto Blender. Los estudiantes deben crear un modelo 3D lo más similar posible a un objeto de referencia propuesto por el profesor y mostrado a través de un conjunto de vistas 2D. La solución propuesta implementa eficientemente un mecanismo de evaluación objetiva que explota la visión por computador y los algoritmos de análisis de imágenes para extraer automáticamente los índices de similitud. Por otra parte, en [2] y [19] se presenta otra herramienta de calificación automática para un curso de modelado sólido de primer año. Ésta se implementa como un conjunto de módulos de software que trabajan en hojas de cálculo de Excel, datos de Solidworks y páginas web, permitiendo que los docentes puedan administrar la clase y dotando a los estudiantes de medios para poder cotejar sus calificaciones e interactuar con el profesor en caso de resultar necesaria la resolución de dudas sobre un determinado resultado.

En [20] se detalla el diseño e implementación de un instrumento de valoración, que permite la evaluación automática por computador de dibujos de ingeniería mecánica. La técnica empleada consiste en la comparación de los dibujos de los alumnos con los de los profesores mediante la identificación de archivos DXF en AutoCAD 2000, midiéndose la precisión para alcanzar una calificación inicial. Los elementos de precisión a tener en cuenta para efectuar una

valoración inicial son: precisión del tipo de objeto (se compara la cantidad de objetos de un mismo tipo en el dibujo del alumno y profesor), precisión de la medición de objetos (se compara el número de entidades objeto con características similares entre el dibujo del alumno y docente) y la entidad del atributo objeto (se compara el número de entidades objeto con igual atributo en los dibujos del alumno y profesor). Sin embargo, y pese a que el número de elementos de precisión del alumno coincida fielmente con los del profesor, no se puede garantizar la exactitud entre dibujos del profesor y alumno, por lo que será necesaria una comparación visual por parte del docente para asignar la calificación final al ejercicio.

El problema se complica cuando lo que se quiere valorar de forma automática es el diseño de los modelos 3D. Por ejemplo, el análisis del árbol de modelado en muchos casos resulta de poca o nula ayuda, ya que el alumno tiene la posibilidad de elegir diferentes caminos, llegando todos ellos a un mismo resultado. Por otra parte, los componentes técnicos y artísticos en el modelado 3D como pueden ser el uso de materiales o la similitud de un dibujo con una plantilla, exceden los requerimientos de ingeniería del propio dibujo técnico y CAD que se consideran en [20], por lo que no sería posible evaluarlos de forma individual al comprobar el contenido del archivo electrónico, siendo necesario valorarlos en un conjunto. Debido a la importancia y complejidad del reconocimiento visual, un procedimiento de evaluación basado en computador para el modelado 3D debería automatizar este paso.

Se presenta en este artículo una propuesta de parámetros a tener en cuenta en una posible autoevaluación automática de ejercicios de modelado sólido industrial centrados en piezas individuales.

## 2. SUPUESTO PRÁCTICO

La necesidad de experimentar procedimientos automáticos de evaluación de ejercicios basados en modelos 3D procede de una experiencia docente universitaria muy amplia. En el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla se imparten asignaturas de “Diseño y Fabricación Asistidos por Ordenador” desde 2001. Estas asignaturas han sido la evolución natural de las de Dibujo y Diseño 2D impartidas durante la década anterior. Actualmente, las titulaciones en las que se imparten son las relacionadas con la Ingeniería Industrial y la Ingeniería Aeronáutica, en 3er y 4º curso de Grado. Desde el año indicado, el número de alumnos que han recibido estas enseñanzas supera los 5000.

La razón de ser de las asignaturas CAD 3D en nuestra escuela de ingeniería es el diseño mecánico. Por tanto, los recursos materiales y la docencia están enfocados a ello, dejando de lado el diseño artístico o, por ejemplo, publicitario. El software empleado es de muy alto nivel: CATIA V5 y SOLID EDGE (ambos, programas de referencia en las industrias aeroespaciales y de producción mecánicas). Puntualmente se ha utilizado, para grupos muy específicos y en menor medida, algunos módulos de otros programas: SOLID WORKS®, UNIGRAPHICS SOLUTIONS® y PARAMETRIC TECHNOLOGIES®.

“Diseño y Fabricación Asistidos por Ordenador” tiene una carga docente de 4,5 créditos ECTS; al impartirse en un cuatrimestre, suponen 3 horas semanales de docencia presencial teórico-práctica, más otras 4,5 horas de trabajo individual del alumno.

Los objetivos fundamentales de esta asignatura pueden sintetizarse en:

- Cognitivos: Dotar al alumno de los conocimientos necesarios para diseñar y modelar piezas industriales y ensamblajes completos, interpretar visualmente modelos y ser capaz de generar planos geométrica y dimensionalmente completos.

- Instrumentales y Profesionales: Realizar, a nivel práctico y con software profesional, modelos de piezas de interés industrial y ensamblajes de máquinas sencillas; interpretar visualmente el resultado obtenido y generar planos reales de fabricación. Procesar los modelos para su exportación a máquinas de fabricación de control numérico.

Al superar la asignatura el alumno podrá modelar piezas complejas, conjuntos, ensamblajes y dispositivos de uso industrial, obtener planos vinculantes de piezas y dispositivos, preparar los elementos modelados para su fabricación mediante control numérico y utilizar con destreza programas de modelado de alto nivel, referente en la industria europea.

Para la obtención de dichos conocimientos y destrezas, los contenidos de la asignatura se agrupan en los siguientes seis bloques:

- I: Generación de modelos sólidos.
- II: Ensamblado de conjuntos.
- III: Planos.
- IV: Modelos basados en superficies.
- V: Otros aspectos de interés.
- VI: Modelado y simulación de procesos de mecanizado.

La metodología de la enseñanza y el aprendizaje está basada en sesiones teórico-prácticas. La componente teórica se imparte durante una hora semanal en la que se exponen los fundamentos teóricos del CAD/CAM. Esta explicación teórica se hace sobre casos prácticos, convenientemente elegidos, de modo que el alumno siga, con su propio ordenador, las

indicaciones del profesor. Asimismo se ponen de manifiesto, cuando es posible, las diferencias que existen entre los paquetes profesionales más usados en la industria. Las prácticas informáticas, propiamente dichas, tienen una duración de dos horas semanales, realizándose ejercicios directamente vinculados a la sesión de teoría con la que se corresponda. En ellas y tras una breve exposición por parte del profesor, los alumnos realizan el trabajo propuesto. Todas las prácticas se realizan en aulas técnicamente bien equipadas (ordenadores individuales, proyectores, etc.).

## 2.1. Parámetros a evaluar

Para poder evaluar un diseño 3D que parte de la información de un plano dado, es necesario definir previamente las variables a valorar con el fin de determinar la estrategia en la verificación de las mismas.

Las variables que se van a considerar serán globales y locales, pues debería existir una evaluación global inicial y, luego un acercamiento al resto de parámetros más locales.

Entre los parámetros globales a tener en cuenta, suponiendo piezas definidas a partir del mismo origen de coordenadas e igual posición, se podrían considerar:

Posicionamiento global  
Volumen de la pieza / masa  
Coordenadas del centro de masas  
Momentos de inercia  
Comparación de la forma superficial respecto a la pieza modelo  
Orden razonable de operaciones de modelado  
Existencia de operaciones que garanticen economía de modelado (simetrías, patrones, espesores, agujeros, etc.)

Inexistencia de operaciones no estrictamente precisas (álgebra booleana, utilización de superficies, etc.)

Estos primeros parámetros ya ofrecerán una evaluación inicial de la pieza, que el alumno podría usar como posible autocorrección.

Entre los parámetros locales a evaluar se podría continuar con el análisis de las operaciones constructivas existentes en el modelado del objeto, tales como partes sólidas, vaciados, agujeros o roscados, todas ellas incluidas en sus árboles de modelado o listas de operaciones, centrándose fundamentalmente en sus características dimensionales y de posición. Entre dichos parámetros se encontrarían:

Cotas generales (ancho, alto, profundidad)  
Cotas dimensionales y posicionales de elementos significativos de la pieza  
Uso adecuado de herramientas de acabado (redondeos, chaflanes, refuerzos, etc.)  
Limitación del número de operaciones factibles de ser agrupadas

Los parámetros citados en los dos grupos son fundamentalmente cuantitativos, si bien alguno de ellos presenta un carácter cualitativo de más difícil evaluación como es el caso del “orden de operaciones de modelado”.

<b>Tipo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Metodología de corrección</b>	<b>Técnica de verificación</b>
<b>Global</b>	Posicionamiento en Sistema de Referencia	Obtención de coordenadas del Bounding Box del modelo propuesto y el del alumno	Sustracción entre coordenadas de modelos. Correcto: 0; Incorrecto: $\neq 0$
<b>Global</b>	Volumen/masa	Obtención del Volumen/masa computado en la aplicación	Sustracción entre cifras de modelos. Correcto: 0; Incorrecto: $\neq 0$
<b>Global</b>	Centro de masas	Consultar coordenadas del centro de gravedad	Ídem anterior
<b>Global</b>	Momentos de inercia	Consultar valores numéricos	Ídem anterior
<b>Global</b>	Forma de la superficie	Inserción como body del modelo propuesto en el modelo del alumno	Diferencia booleana entre bodies. Correcto: sin cuerpo resultante. Incorrecto: existe sólido residual.
<b>Global</b>	Orden de operaciones	Comprobación entre árboles de modelado	Secuencia razonable de operaciones básicas: SI: correcto; NO: incorrecto
<b>Global</b>	Operaciones que optimizan el modelado	Comprobación de su existencia en el árbol de modelado	Correcto: existen operaciones Incorrecto: inexistencia de ellas
<b>Global</b>	Operaciones estrictamente no precisas	Comprobación de su inexistencia en el árbol de modelado	Correcto: inexistencia Incorrecto: existencia de ellas
<b>Local</b>	Dimensiones 2D/3D	Resta de perfil, de alzado, planta o perfil	Sustracción dimensional entre modelos. Correcto: 0; Incorrecto: $\neq 0$
<b>Local</b>	Posición y dimensiones de elementos significativos	Obtención de coordenadas y dimensiones del modelo propuesto y el del alumno	Sustracción entre coordenadas y dimensiones de modelos. Correcto: 0; Incorrecto: $\neq 0$
<b>Local</b>	Operaciones de acabado	Búsqueda por nombre y número	Está o no
<b>Local</b>	Operaciones factibles de agrupar	Búsqueda por nombre y número	Está o no

## 2.2. Metodologías a usar

Para la comprobación de los parámetros expuestos en la Tabla 1, así como la aplicación de las metodologías de corrección y sus técnicas de verificación, los primeros intentos deben hacerse mediante procedimientos vectoriales ya que todos los modelos CAD 3D, y por supuesto también los 2D, son modelos vectoriales. No obstante, es importante investigar otras metodologías basadas en imágenes (técnicas “raster”). En los procedimientos vectoriales quedan agrupados aquellos que comparan coordenadas, valores numéricos, y formas que pueden cuantificarse; en los raster, fundamentalmente aquellos que detectan diferencias entre imágenes.

En ambos casos, las verificaciones que se llevarán a cabo se aplican al modelo del alumno (su ejercicio académico) en formato digital; este modelo deberá ser compatible con el enunciado del ejercicio. Por otra parte, el modelo de referencia siempre será el ejecutado por el profesor. Se da por hecho, que aunque el modelo del alumno difiera del modelo del profesor ello no implica que no sea correcto si el sólido es válido. Cuando decimos que el modelo del profesor es la referencia queremos expresar que dicho modelo es una forma de modelar más adecuada y la que hay que intentar que el alumno aprenda, liberándole de errores que pueda haber adquirido.

Puesto que la autocorrección, o su meta final que es la corrección automática, se basa en la comparación con un modelo de referencia, es necesario que ambos modelos partan de bases similares. Por ello deben establecerse en el

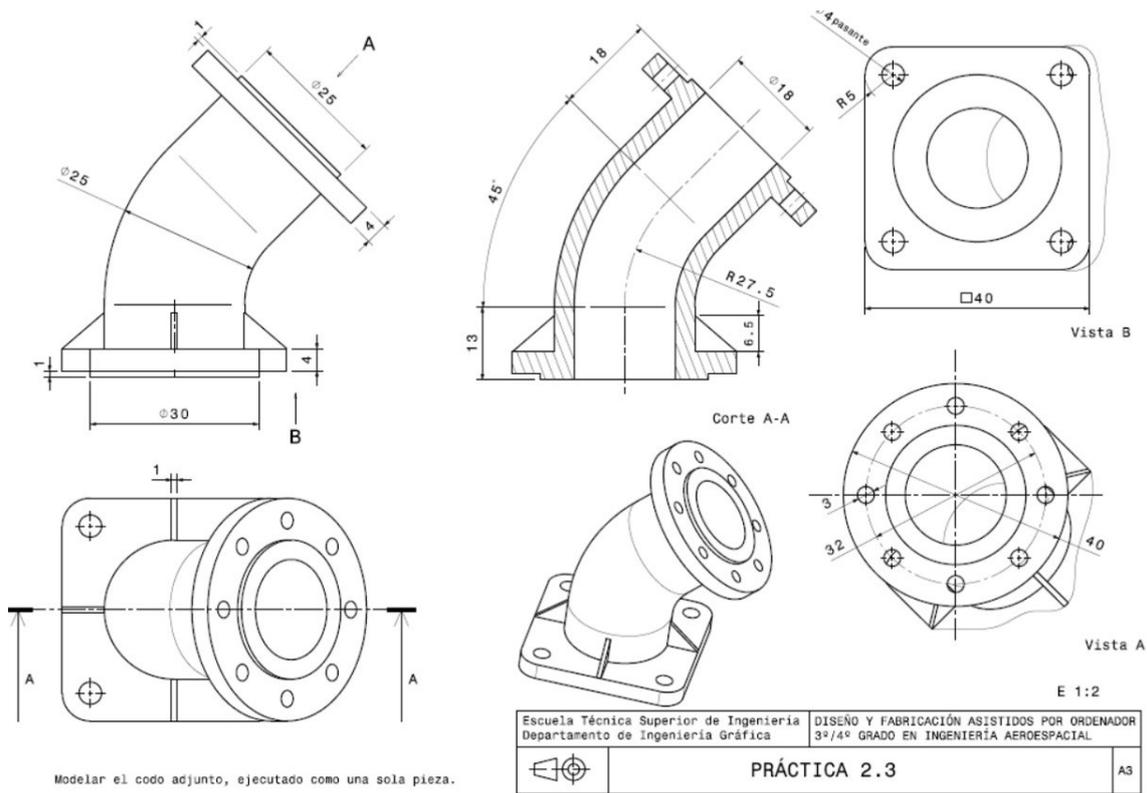
programa de diseño unidades iguales (v.g.: cotas en mm, áreas en cm<sup>2</sup>, volúmenes en mm<sup>3</sup>, etc.).

Asimismo, se deberá tener en cuenta la sensibilidad del programa de cálculo: una misma parte de una pieza ejecutada de dos formas distintas o ejecutada en otro ordenador, incluso con el mismo software, puede dar resultados que difieren por encima de la cifra significativa menor (o de sus decimales). Por ello, antes de poner en práctica cualquier proceso de autocorrección hay que asegurarse de que los resultados no van a diferir sensiblemente. En el ejemplo que se desarrolla en el apartado siguiente se analiza este efecto, comprobando que normalmente no se presentan conflictos.

## 3. RESULTADOS

La puesta en práctica de la metodología vectorial antes descrita se ha validado por medio de un ejercicio de clase de dificultad media. Este ejercicio se muestra en la figura 1. Se trata de una pieza de enlace de tuberías de pequeño diámetro de uso en la industria aeronáutica. La pieza es acodada y tiene dos bridas de conexión. El enunciado entregado a los alumnos es completo geométrica y dimensionalmente, como se observa en la fig.1.

El profesor ha modelado la pieza (de hecho, el plano del enunciado se ha generado a partir de ese modelo) según su criterio, procurando que sea lo más razonable posible desde el punto de vista de la fabricación y reduciendo al máximo la cantidad de operaciones precisas (esto último siempre puede ser discutible).



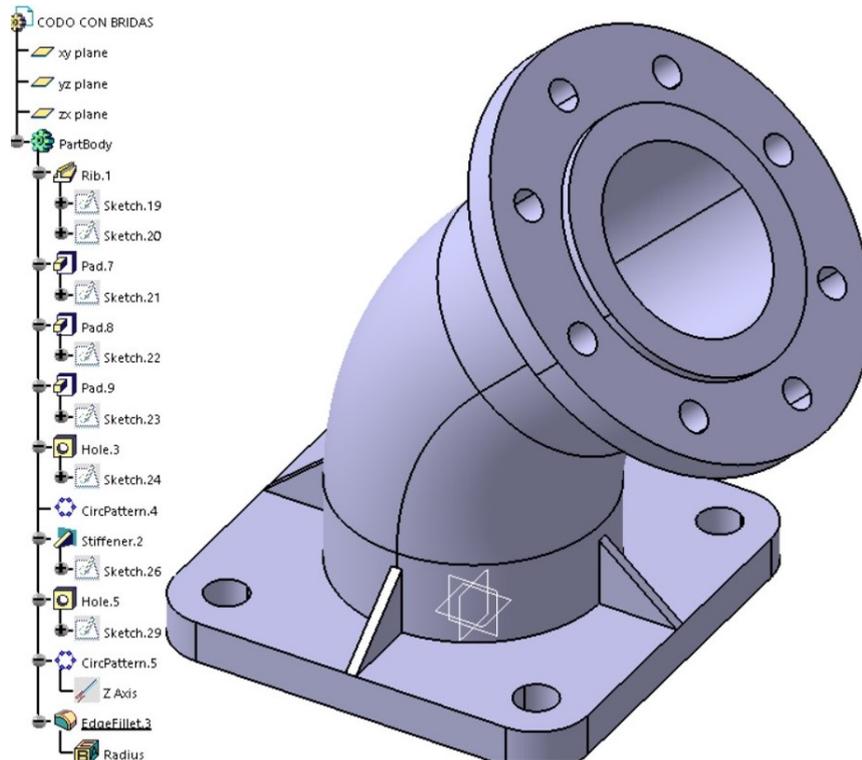
**Fig. 1:** Enunciado de un ejercicio tipo

La solución del profesor se muestra en la fig. 2, observando a su izquierda el árbol de operaciones o árbol de modelado. Las operaciones de modelado están, en este caso, muy optimizadas. La tubería en sí misma se ha generado mediante una operación de barrido de dos circunferencias concéntricas (“rib”), añadiendo la brida rectangular y la circular (creadas mediante extrusiones, “pad”). Posteriormente se genera un agujero en cada brida (“hole”) y el resto de ellos con patrones circulares (“circpattern”); lo mismo se ha hecho con los nervios de la brida inferior (“stiffener”). Finalmente se redondean las aristas de dicha brida (“edgefillet”).

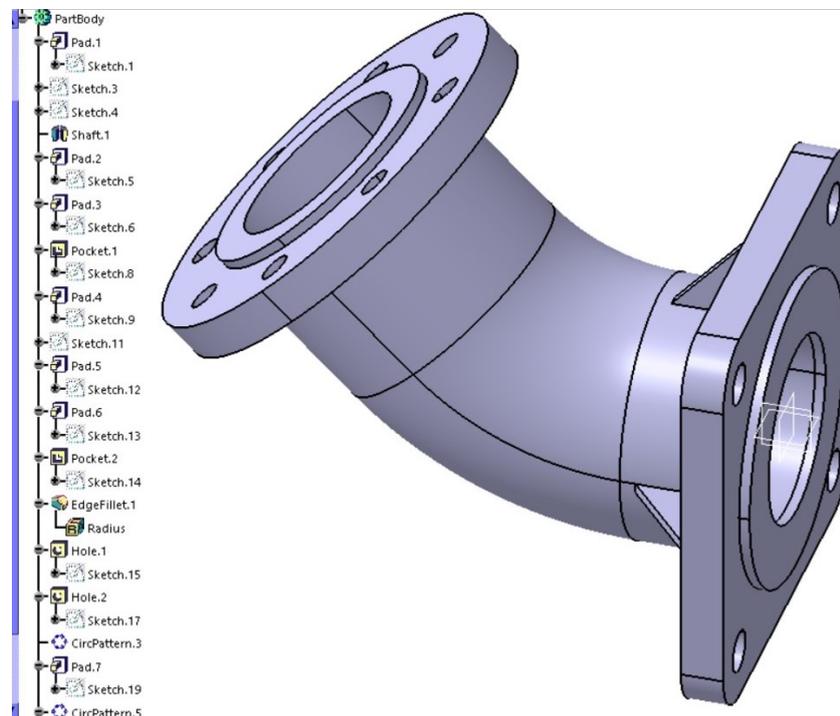
La solución de un alumno es la mostrada en la fig. 3. Lo primero que se observa es que el alumno ha diseñado la pieza con su base o brida rectangular apoyada en un plano vertical y no en el horizontal como ha hecho el profesor. Este

hecho no debe considerarse un error pues la pieza puede ser la misma; un aspecto importante es el hecho de que los alumnos deben aprender a modelar de una forma profesional y no se les debe restringir en cuestiones no importantes. Sí es cierto que esa posición de la pieza puede dificultar su corrección por el procedimiento propuesto.

El objeto aparentemente está bien modelado, notando a la vista del árbol de modelado que el alumno ha diseñado el codo mediante dos extrusiones lineales (“pad”) y una de revolución (“shaft”), mientras que el profesor lo ha hecho con una única operación de barrido; nuevamente hay que indicar que ello no es un error de modelado.



**Fig. 2:** Modelo de referencia (profesor)



**Fig. 3:** Modelo realizado por un alumno

Para evaluar este modelo del alumno se le aplican los criterios de la Tabla 1. Esta evaluación es inicialmente manual, siendo objeto de este trabajo el ver qué problemas se presentan en dicha evaluación antes de intentar automatizarla.

**a) Posicionamiento global.** Se pretende analizar si el alumno ha posicionado bien el objeto y si sus proporciones globales son correctas.

Evidentemente el modelo del alumno no se ha posicionado igual que el del profesor, pero este hecho no es vinculante, como ya se ha comentado, salvo que expresamente así se indique en el enunciado.

Para ver si las proporciones globales son correctas puede analizarse el Bounding Box de cada pieza. En la fig 4, a modo de ejemplo, se muestra parte de la base de datos de la que pueden extraerse los parámetros buscados.

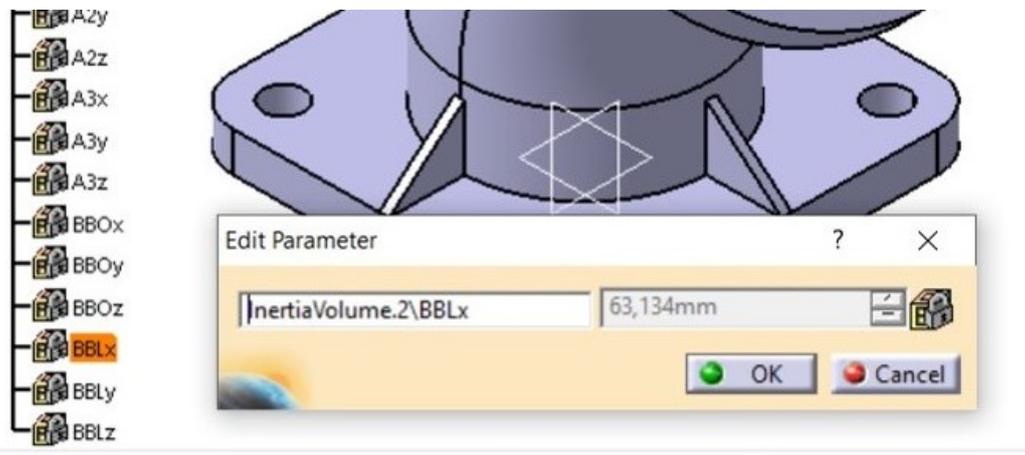


Fig. 4: Ejemplo de obtención de datos de un Bounding Box

Tanto la pieza modelada por el profesor como la modelada por el alumno quedan confinadas en un paralelepípedo mínimo de 63,143 x 40 x 39,438 mm.

Por tanto, este parámetro de comparación se considera correcto.

**b) Volumen.** Este parámetro objetivo es especialmente importante pues debe ser igual en ambos modelos, teniendo en cuenta ciertas tolerancias ya mencionadas en el Ap.2.2. Su obtención es directa al solicitar al programa sus

características de inercia. La fig. 5 muestra algunos parámetros del modelo del profesor.

En ambos casos el volumen es de 19,735 cm<sup>3</sup>, por lo que la solución del alumno es correcta en esta comprobación.

**c) Centro de masas.** De la base datos expuesta en la fig. 5, aplicada a ambos modelos, se obtienen los datos siguientes:

Centro de masas del modelo del profesor: (0, 5.998, 22.466)

Centro de masas del modelo del alumno: (0, -21.466, 5.998)

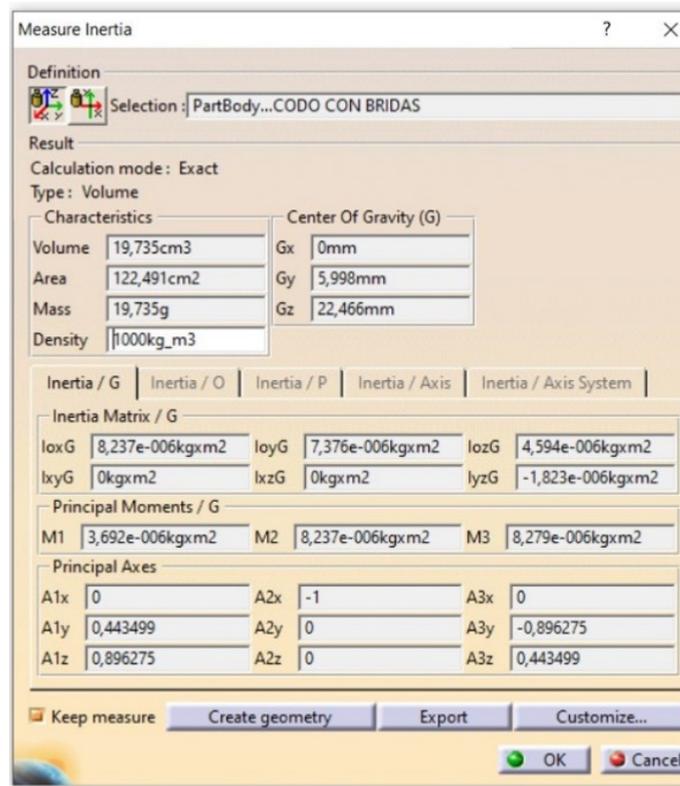


Fig. 5: Ejemplo de base de datos de propiedades de una pieza

Ambas parejas de coordenadas muestran que los centros de masas se encuentran en el mismo punto de ambos objetos. La coordenada X es nula en ambos modelos lo que indica que las piezas son perfectamente simétricas respecto del plano YZ; la coordenada Y del modelo del profesor y la Z del alumno también son iguales (5.998 mm) ya que éste ha posicionado la base de la pieza en otro plano; las coordenadas Z e Y, respectivamente, tienen distinto signo nuevamente por la posición de los modelos y sus valores se diferencian en 1 mm debido a que en el modelo del profesor el plano XY se ha considerado en el saliente de 1mm de altura de la base cuadrada, habiendo posicionado el alumno el plano XZ directamente sobre la propia base.

Por ello, ambas ternas de coordenadas son iguales, debiendo considerar correcta la solución del alumno en este parámetro de comparación.

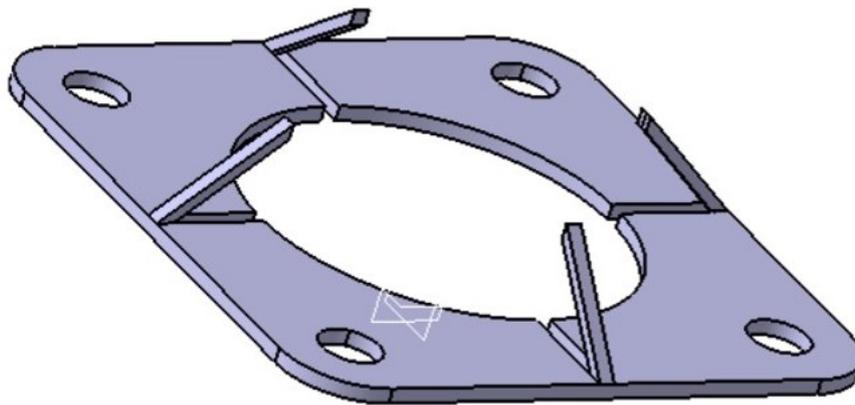
**d) Momentos de inercia.** La información sobre los momentos de inercia puede ser exhaustiva e innecesaria. Puesto que dependen del posicionamiento de la pieza en el sistema de referencia lo razonable es considerar sólo los Momentos Principales al ser estos invariantes de las posiciones. En ambos modelos se observa que  $M1 = 3,692 \cdot 10^{-6} \text{ kgcm}^2$ ,  $M2 = 8,237 \cdot 10^{-6} \text{ kgcm}^2$ ,  $M3 = 8,27 \cdot 10^{-6} \text{ kgcm}^2$ , por lo que ambas piezas son similares en estos parámetros.

**e) Forma de la superficie.** Con este criterio se pretende confirmar que ambas piezas tienen formas superficiales iguales, pues pese a coincidir en los parámetros anteriores sería posible diferencias en el posicionamiento de elementos simétricos que no afectan al centro de masas o al volumen pero que hacen distintas las piezas.

Una forma de apreciarlo es obtener la diferencia booleana de ambas piezas y si el resultado no es nulo, es decir existe algún objeto sólido resultante, entonces las piezas no son exactamente iguales. Para ello se precisa insertar en uno de los modelos el otro modelo como un cuerpo independiente (body) y

proceder a ejecutar su diferencia. En nuestro ejemplo este procedimiento no es de fácil verificación pues los modelos no están posicionados de igual forma y el resultado siempre sería un cuerpo diferencia booleana entre el modelo profesor y el modelo alumno.

Para mostrar lo que sucedería en el caso de que ambos modelos estuviesen igualmente posicionados se ha obtenido la diferencia booleana entre el modelo del profesor (fig. 2) y otro igual a él, pero con una base cuadrada ligeramente más delgada (3 mm en vez de 4 mm). La diferencia resultante se muestra en la fig. 6, en donde aparece la parte del modelo del profesor que no existe en el modelo del alumno.



*Fig. 6: Ejemplo de diferencia booleana de dos piezas no exactamente iguales*

Por lo expuesto, este parámetro de comparación no es aplicable al ejemplo que se está desarrollando. Esto muestra que la automatización total en la autocorrección de ejercicios 3D no siempre será posible, pero también es cierto que los parámetros descritos previamente y los siguientes son más que suficientes.

**f) Orden de operaciones.** La secuencia de las operaciones de modelado es uno de los aspectos más importantes en el análisis de la

calidad de un modelo, siendo totalmente cualitativo.

En el modelo del alumno (fig.3) se observa un razonable conjunto de operaciones iniciales, generación del codo y construcción de las bridas, y posteriores: definición de agujeros, refuerzos y redondeos. De ello se deduce que la pieza se ha diseñado desde el todo y hacia las partes, siguiendo un adecuado proceso de modelado.

**g) Operaciones que optimizan el modelado.**

Esta evaluación consiste en verificar la existencia de operaciones que reducen la cantidad de ellas en el árbol de modelado. En el modelo del alumno se observa la existencia de un patrón circular para los agujeros de la brida circular, lo que es muy adecuado. Lo mismo sucede con los nervios de la base cuadrada; sin embargo, el nervio que sirvió de partida para los otros tres se ha modelado como una extrusión, no utilizando la opción de generación de nervios y refuerzos propia del programa de diseño, suponiendo esto una deficiencia no invalidante. En cuanto a los agujeros de la base cuadrada, tras diseñar dos de ellos se ha aplicado una simetría lo que es correcto, si bien el modelo del profesor utilizaba sólo uno y un patrón circular.

A la vista de lo realizado por el alumno, la única deficiencia encontrada ha sido la no utilización de una operación programada (generación de refuerzos) que debería utilizarse en vez de realizar el diseño de forma manual.

**h) Operaciones no precisas.** La existencia de operaciones no precisas debería ser un punto de especial control. La pieza propuesta es un objeto puramente mecánico que podría ser fabricada con herramientas manuales o máquinas-herramienta sin mayores complicaciones que las derivadas de su forma.

Durante el aprendizaje del modelado, los alumnos tienen tendencia a emplear procedimientos que aprenden para otros usos, y que les resultan atractivos, pero que no deberían ser de uso corriente en la mayoría de los diseños mecánicos que se les proponen. Entre ellos caben destacar la utilización del álgebra booleana o las superficies (que posteriormente se solidifican). En la medida de lo posible, en nuestra opinión, esta utilización de herramientas

no precisas, por estar fuera de contexto, debe evitarse.

En la solución del alumno no se observan estas deficiencias, por lo que es correcta en este aspecto analizado.

**i) Dimensiones 2D/3D.** Este tipo de comprobación consiste en obtener las cotas 2D, presentes en los bocetos de partida para las operaciones de generación (“sketch”) y las propias cotas de las operaciones (longitudes de extrusión o barrido, ángulos de giro, etc.), tanto en el modelo del profesor como en el del alumno. Las cotas deben ser comparadas para asegurar que generan sólidos idénticos, lo que es equivalente a restarlas y dar por bueno el modelo en el caso de diferencias nulas. Esta primera comparación de cotas, en el punto siguiente se realiza otra, se refiere a las cotas de partes de la pieza que afecten a sus dimensiones generales, de ser posible. En nuestro ejemplo, una dimensión característica sería la longitud del codo, incluyendo sus dos partes rectas y la zona curva; se comprueba que, pese a que el alumno ha realizado el codo en tres partes y el profesor en uno, las longitudes son iguales (52,598 mm).

Una alternativa a esta operación analítica podría consistir en un procedimiento puramente gráfico basado en tomar alzados, plantas y perfiles y compararlos. Esta comparación podría ser incluso sólo visual y dada la dificultad de hacerlo en el espacio podría ejecutarse en el plano. En la fig. 7 se han superpuesto dos perfiles, observando su concordancia. Este procedimiento implica una intervención del profesor que puede resultar excesiva por el tiempo empleado, mientras que la inspección de cotas en el árbol de modelado es mucho más directa.

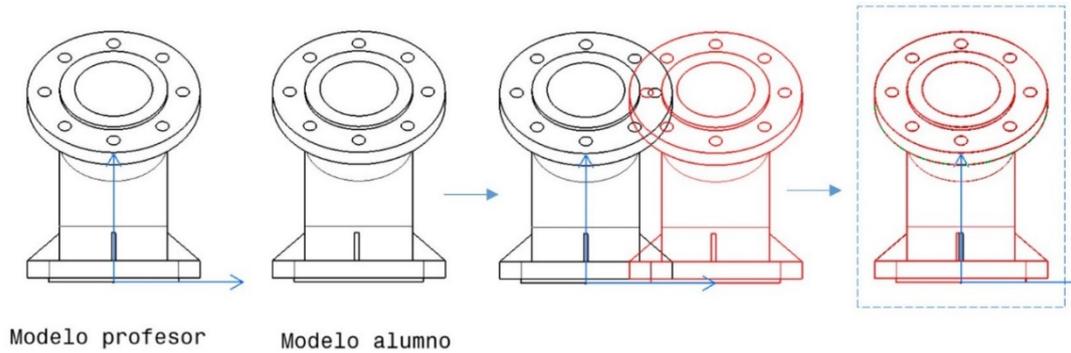


Fig. 7: Un ejemplo de alternativa gráfica para la comparación dimensiones generales

**j) Posición y dimensiones de elementos significativos.** Esta comprobación es similar a la anterior, pero está centrada en la forma de partes importantes de la pieza y en su posición respecto al todo. En el caso que se está analizando, en particular, se puede comprobar que las dos bridas, la circular y la base cuadrada, están posicionadas a 1 mm de los extremos del codo y que sus dimensiones son de 40 mm (lado del cuadrado para la base y diámetro de la brida superior). La verificación de estos parámetros muestra que la pieza es correcta.

**k) Operaciones de acabado.** La experiencia docente nos muestra que un alumno ha aprendido a modelar cuando utiliza herramientas programadas para ciertas operaciones en vez de diseñarlas con otras herramientas básicas.

En el modelo del alumno se observa que ha empleado correctamente bases de datos de agujeros (“hole”) y efectuado redondeos de aristas con comandos del software destinados expresamente para ellos. Como ya se ha expuesto, sin embargo, los nervios (“stiffner”) no se han diseñado de esta forma, sino que el alumno los ha generado como un sólido más (“pad”). La calificación de este apartado sería

positiva globalmente pero habría que hacerle ver al alumno la incorrección cometida.

**l) Operaciones factibles de agrupar.** Cuando una operación debe efectuarse repetidamente es preciso agruparla como una sola operación en el árbol de modelado; en caso contrario aquél se extiende y se vuelve confuso. Para la pieza en cuestión esto se refiere a los cuatro redondeos de sus aristas verticales, observando que el alumno las ha agrupado en una operación (“edgefillet”) en vez de hacer cuatro redondeos individuales. La existencia de estas agrupaciones es correcta.

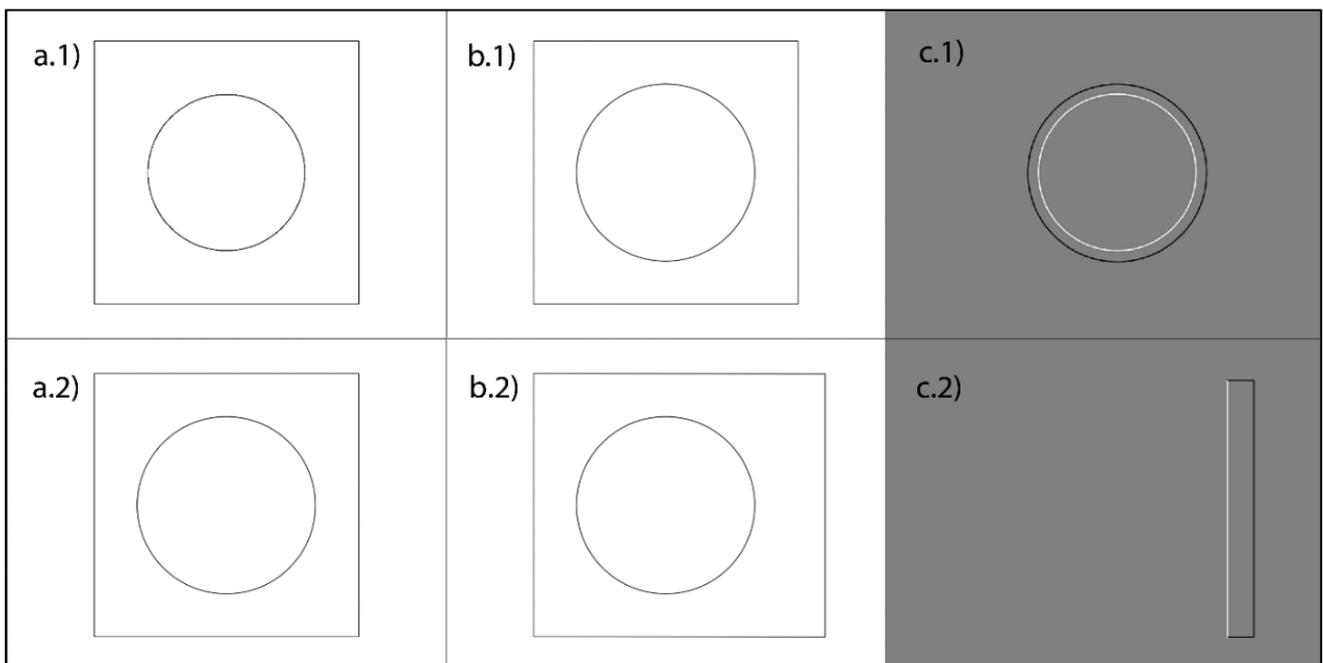
La exposición de este apartado muestra que es posible realizar una corrección de ejercicios de modelado, CAD 3D, siguiendo pautas bien definidas. La ejecución del proceso puede, y debe, ser manual inicialmente, e incluso podría ser llevada a cabo por el propio alumno como autoevaluación. El objeto final de este procedimiento, como se ha expuesto en el Ap. 2.2, es programar algoritmos para entrar en el modelo y obtener de él todas las variables que puedan necesitarse; una herramienta para ello es la programación en VBA (Visual Basic for Applications).

En el citado apartado también se ha planteado la posibilidad de utilizar técnicas ráster en vez de

vectoriales. En la fig.8 se muestra un ejemplo, orientado a bocetos que efectuaría comprobaciones similares a las descritas en los puntos “i” y “j” de las anteriores comprobaciones vectoriales. En la figura se muestran dos imágenes, volcados de pantalla o similares, de una operación consistente en la ejecución de un agujero sobre una base cuadrada. Las dos imágenes de la izquierda muestran la geometría pedida, las centrales son los resultados del modelado del alumno; la diferencia de cada pareja de imágenes en una misma fila deriva en “c.1” en donde se observa

que el agujero del alumno es inferior al real y en “c.2” que pone de manifiesto que la base del alumno no es cuadrada.

Esta técnica presenta un inconveniente: las imágenes tienen que estar igualmente referenciadas y ser del mismo tamaño pues en caso contrario su diferencia no tendría sentido. Sin embargo, esa preparación previa puede realizarse sin demasiadas dificultades mediante zum muy controlados.



**Fig. 8:** Ejemplo de técnica ráster para la comparación de operaciones de dos modelos.

## 4. CONCLUSIONES

La generación de una herramienta que ayude en la autocorrección de ejercicios de modelado 3D sería de gran interés, ya que aportaría efectividad y agilidad al proceso de evaluación, así como también mayor objetividad al utilizar un sistema informático que aísle factores de similitud e implemente reglas de evaluación medibles de forma automática.

Los ejemplos anteriores confirman que, aunque la discusión colectiva de las calificaciones individuales puede contribuir a una mayor imparcialidad de la nota final, la objetividad solo puede lograrse mediante un sistema informático capaz de separar elementos semejantes e implementar pautas de evaluación ponderables automáticamente.

Siempre existirán casos particulares, pues una pieza con un error de escala inicial, mostrará erróneos casi todos los parámetros estudiados. Estos casos irán mejorando o depurando la posible aplicación a realizar.

## REFERENCIAS

- [1] F. Salmerón Medina, F. Gómez Estern Aguilar, F. A. Valderrama Gual, and J. F. Carbonell Márquez, "Automatización de la generación de enunciados y de la evaluación en asignaturas de CAD en grados de ingeniería," 2017.
- [2] D. H. Baxter and M. J. Guerci, "Automating an introductory computer aided design course to improve student evaluation," *ASEE Annu. Conf. Proc.*, pp. 6503–6510, 2003.
- [3] A. Sanna, F. Lamberti, G. Paravati, and C. Demartini, "Automatic assessment of 3D modeling exams," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 2–10, 2012.
- [4] P. Fournier-Viger, R. Nkambou, and A. Mayers, "Evaluating Spatial Representations and Skills in a Simulator-Based Tutoring System," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 63–74, 2008.
- [5] R. E. Ferdig, "Assessing technologies for teaching and learning: Understanding the importance of technological pedagogical content knowledge," *Br. J. Educ. Technol.*, vol. 37, no. 5, pp. 749–760, Sep. 2006.
- [6] A. Tartaglia and E. Tresso, "An automatic evaluation system for technical education at the university level," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 45, no. 3, pp. 268–275, Aug. 2002.
- [7] C. Sánchez, D. Muñoz de la Peña, and F. Gómez-Estern, "Generación automática de problemas de diseño de controladores para sistemas lineales autoevaluables con Doctus," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind.*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2020.
- [8] A. I. González-Tablas Ferreres, K. Wouters, B. Ramos Álvarez, and A. Ribagorda Garnacho, "EVAWEB: A web-based assessment system to learn X.509/PKIX-based digital signatures," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 50, no. 2, pp. 112–117, May 2007.
- [9] R. C. E. Guzman, "Self-assessment in a feasible, adaptive web-based testing system - *IEEE Journals & Magazine*," *IEEE Transactions on Education*, 2005. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1532378>. [Accessed: 13-Mar-2020].
- [10] Gwo-Jen Hwang, "A test-sheet-generating algorithm for multiple assessment requirements - *IEEE Journals & Magazine*," *IEEE Transactions on Education*, 2003. [Online].

Available:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1220732>. [Accessed: 13-Mar-2020].

- [11] G. Conole and B. Warburton, "A review of computer-assisted assessment," *ALT-J*, vol. 13, no. 1, pp. 17–31, Mar. 2005.
- [12] J. Whittington and K. J. Nankivell, "Teaching strategies and assessment measures for rapidly changing technology programs," in *ACM SIGGRAPH 2006 Educators Program, SIGGRAPH '06*, 2006, p. 45.
- [13] S. Isotani and L. de O. Brandão, "An algorithm for automatic checking of exercises in a dynamic geometry system: iGeom," *Comput. Educ.*, vol. 51, no. 3, pp. 1283–1303, Nov. 2008.
- [14] V. Petridis, S. Kazarlis, and V. George Kaburlasos, "ACES: An interactive software platform for self-instruction and self-evaluation in automatic control systems," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 46, no. 1, pp. 102–110, Feb. 2003.
- [15] L. C. Jacobs and C. I. Chase, "Developing and Using Tests Effectively: A Guide for Faculty," p. 123, 1992.
- [16] M. D. Koretsky, D. Amatore, C. Barnes, and S. Kimura, "Enhancement of student learning in experimental design using a virtual laboratory," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 51, no. 1, pp. 76–85, Feb. 2008.
- [17] I. Gustavsson et al., "On objectives of instructional laboratories, individual assessment, and use of collaborative remote laboratories," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 263–274, Oct. 2009.
- [18] H. Jiang, L. Zhang, and W. Ye, "The automatic evaluation strategies and methods of multimedia work assignments," in *Proceedings - 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, CiSE 2009*, 2009.
- [19] D. B.-P. of the 58<sup>th</sup> Midyear and U. Annual 2003, "Evaluating an automatic grading system for an introductory computer aided design course," *ci.nii.ac.jp*, no. Proceedings of the 58<sup>th</sup> Annual Midyear Conference of the Engineering Design Graphics Division of the American Society for Engineering Education, Scottsdale, Arizona, pp. 39–44, 2003.
- [20] "Computer -Aided Marking System for Engineering Drawing - Learning & Technology Library (LearnTechLib)," Society for Information Technology & Teacher Education International Conference, 2004. [Online]. Available: <https://www.learntechlib.org/p/14573/>. [Accessed: 16-Mar-2020].