

Jornadas de Automática

Herramienta de generación automática de defectos en modelos CAD

Navarro-González, J. Daniel^{a,*}, Bastida-Miguel, Héctor^b, Garrido-Rey, Laura^a, Tornero, Josep^b, Girbés-Juan, Vicent^a

^a Departament d'Enginyeria Electrònica, Universitat de València, ETSE-UV, Av. de la Universitat, s/n, 46100 Burjassot, España.

^b Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, Camino Vera s/n, 46022, Valencia, España.

To cite this article: Navarro-González, J. D., Bastida-Miguel, H., Garrido-Rey, L., Tornero, J., Girbés-Juan, V. 2025. Automatic Defect Generation Tool in CAD Models. *Jornadas de Automática*, 46.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12241>

Resumen

La inspección y reparación automatizada de defectos en carrocerías es un reto relevante en la automatización del sector de la automoción, especialmente en tareas de tratamiento superficial como el lijado o el pulido. Dado que los ensayos físicos en tareas de tratamiento superficial implican procesos destructivos y costosos, se propone el uso de entornos virtuales para validar nuevos algoritmos de planificación de trayectorias y control de fuerza. Este trabajo presenta una herramienta para la generación semiautónoma y parametrizada de defectos sobre modelos CAD, que se integrará en un sistema de inspección y reparación basado en ROS y Gazebo. El sistema utiliza el gemelo digital de un robot KUKA LBR iiwa con sensores de fuerza/torque, montado sobre una plataforma móvil, e incorpora modelos virtuales de herramientas y consumibles. La herramienta permite generar tanto micro-defectos como macro-defectos (golpes y abolladuras) de distintas formas. Esto facilita el desarrollo y validación de algoritmos de reparación en simulación, acelerando el diseño de soluciones industriales. Se prevé la futura ampliación con algoritmos de clasificación y priorización de defectos, aunque queda fuera del alcance de este trabajo.

Palabras clave: Manipuladores robóticos, Control de fuerza, Robots colaborativos, Herramientas flexibles, Gemelo digital, Trabajo en entornos reales y virtuales, Garantía de calidad y mantenimiento.

Automatic Defect Generation Tool in CAD Models

Abstract

Automated inspection and repair of defects on car bodies is a major challenge in the automation of the automotive sector, especially in surface treatment tasks such as sanding or polishing. Since the physical tests required in surface treatment tasks are destructive and costly, the use of virtual environments is proposed to validate new trajectory planning and force control algorithms. This work presents a tool for the semi-autonomous and parameterized generation of defects on CAD models, which will be integrated into an inspection and repair system based on ROS and Gazebo. The system uses the digital twin of a KUKA LBR iiwa robot with integrated force/torque sensors, mounted on a mobile platform, and includes virtual models of tools and consumables. The tool enables the generation of both micro-defects and macro-defects (dings and dents) in various shapes. This facilitates the development and validation of repair algorithms in simulation, accelerating the design of industrial solutions. Future work includes extending the system with algorithms for defect classification and prioritization, although this remains outside the scope of the present work.

Keywords: Robotic manipulators, Force control, Collaborative robots, Flexible tools, Digital twin, Work in real and virtual environments, Quality assurance and maintenance.

1. Introducción

La robótica y la visión por computador han avanzado significativamente en las últimas décadas, consolidándose como tecnologías clave para la automatización de procesos en entornos industriales complejos. Su capacidad para ejecutar

tareas repetitivas con alta precisión e interpretar información en tiempo real, ha abierto nuevas oportunidades en ámbitos como la logística, la manufactura, la inspección de calidad o la cirugía asistida. Según estudios recientes, su implementación ha mejorado la eficiencia, seguridad y trazabilidad en entornos productivos (Shahria *et al.*, 2022).

*Autor para correspondencia: Jose.D.Navarro@uv.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

En el sector de la automoción, su integración ha supuesto un salto cualitativo en la automatización de procesos críticos como el ensamblaje de componentes o la verificación final. Gracias al uso combinado de sensores, cámaras y algoritmos inteligentes han logrado reducir errores, optimizar recursos y mejorar los estándares de calidad (Bogue, 2013).

La inspección y reparación automática de defectos en carrocerías es una de las aplicaciones más desafiantes en este contexto, especialmente en fases de tratamiento superficial como lijado, matizado o pulido. La identificación precisa de imperfecciones, como abolladuras, cráteres o micro-defectos, y su reparación mediante manipuladores robóticos requiere sistemas avanzados de percepción y decisión basados en visión e inteligencia artificial (Morales *et al.*, 2025). Esta automatización incrementa la eficiencia del proceso y garantiza mayor homogeneidad en el acabado final.

Sin embargo, desarrollar y validar algoritmos para estas tareas presenta dificultades. Los ensayos físicos necesarios son, en muchos casos, destructivos, costosos y limitados por la disponibilidad de recursos reales. Esta problemática ha impulsado el uso de entornos virtuales para simular defectos, planificar reparaciones y evaluar el comportamiento del sistema sin comprometer equipos o materiales. En este sentido, los gemelos digitales y los simuladores dinámicos han emergido como herramientas clave para acelerar el desarrollo de soluciones fiables (Mohsen *et al.*, 2023).

La adopción de gemelos digitales en la industria permite replicar de forma virtual tanto la geometría como el comportamiento dinámico de sistemas reales, integrando robots, sensores y piezas de trabajo en un entorno de simulación interactivo. Estas tecnologías transforman el modo en que se diseñan, prueban y optimizan procesos industriales, permitiendo validar estrategias de control, detectar errores y reducir el tiempo de puesta en marcha (Iranshahi *et al.*, 2025).

Para evitar la necesidad de realizar pruebas sobre sistemas físicos y facilitar el desarrollo de soluciones para el tratamiento superficial de carrocerías (Garcia *et al.*, 2021), este artículo propone una herramienta para la generación semiautónoma y parametrizada de defectos, diseñada para entornos virtuales. Esta herramienta forma parte de un sistema basado en ROS y Gazebo, que incluye el gemelo digital de un robot KUKA LBR iiwa montado sobre una plataforma móvil, junto con modelos virtuales de herramientas, sensores de fuerza/par y cámaras. La generación realista de defectos permitirá entrenar y validar algoritmos de inspección, clasificación y reparación en un entorno controlado, con vistas a su futura implementación en el sistema físico. La posibilidad de integrar técnicas de inteligencia artificial y visión artificial permitirá en el futuro la caracterización automática de defectos reales.

2. Definición del Problema

Partimos de un sistema de inspección y reparación de defectos basado en el simulador Gazebo y el framework Robot Operating System (ROS). En concreto, se emplea el gemelo digital del robot KUKA LBR iiwa 14 R820 mediante su correspondiente paquete de ROS (Chatzilygeroudis *et al.*, 2019). Además, en la muñeca del manipulador robótico se ha integrado un sensor de fuerza/par modelo FT45. También se

han modelado virtualmente la herramienta y los consumibles para el tratamiento superficial. Finalmente, el robot virtual se ha montado sobre una plataforma móvil idéntica a la utilizada en el sistema físico real.



Figura 1: Robot real KUKA LBR iiwa 14 R820

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta para la generación de defectos de forma semiautónoma y completamente parametrizada. Para ello, se emplearán distintos modelos matemáticos que permitan representar los defectos más característicos, tales como cráteres, montículos, gotas, entre otros. Además de los micro-defectos (<1 mm), se generarán también macro-defectos del tipo ding-dent, principalmente golpes y abolladuras de distintas formas y tamaños, tanto hacia el interior como hacia el exterior de la carrocería.

La funcionalidad de esta herramienta permitirá modificar las mallas de las distintas piezas a tratar, de modo que un robot virtual pueda ejecutar procesos de reparación sobre ellas. Esta solución se integrará en el sistema de inspección, clasificación y reparación automática de defectos previamente desarrollado. Asimismo, la herramienta se diseñará para permitir, en un futuro, la incorporación de un algoritmo de ordenación de defectos según parámetros como tamaño, forma o posición, con el fin de optimizar el proceso de reparación. No obstante, el desarrollo de dichas funcionalidades queda fuera del alcance del presente artículo.

3. Metodología

La herramienta desarrollada se basa en una interfaz gráfica de usuario (GUI) construida íntegramente en Python a través de Visual Studio Code, utilizando las bibliotecas PyQt5 para la gestión de la interfaz y VTK (Visualization Toolkit) para la visualización, manipulación y modificación de modelos 3D en formato STL. El objetivo principal de esta herramienta es permitir la generación de defectos artificiales sobre mallas

CAD de carrocerías de forma semiautónoma y completamente parametrizada.

La arquitectura del sistema se compone de un visor 3D central basado en QVTKRenderWindowInteractor, acoplado a un panel de control lateral implementado mediante QDockWidget. Este panel incluye controles para seleccionar el tipo de defecto, ajustar parámetros geométricos (radio, amplitud, curvatura, etc.), determinar el número de defectos, y visualizar o restaurar vistas de cámara.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo simplificado que indica la interacción entre los principales componentes de la herramienta: interfaz gráfica, procesamiento geométrico con VTK y lógica de generación de defectos.

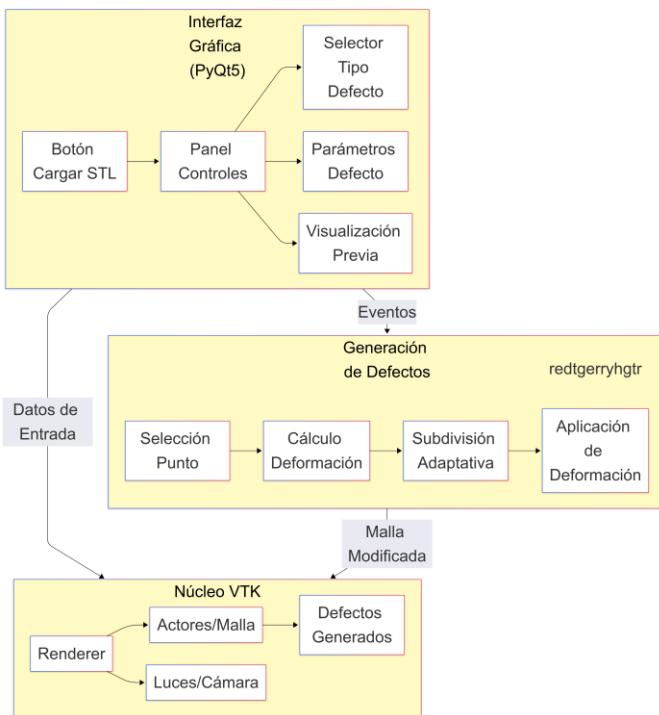


Figura 2: Diagrama de flujo de la herramienta

El modelo de interacción está diseñado para facilitar el uso por parte del usuario. Este comienza seleccionando un archivo STL, el cual se carga en el visor 3D. A través de la interfaz lateral, se definen los parámetros del defecto deseado. Tras seleccionar una región de la malla, se generan deformaciones que pueden visualizarse en tiempo real. Esta lógica interactiva permite iterar rápidamente sobre distintas configuraciones y validar los resultados antes de aplicar cambios permanentes.

El sistema permite cargar archivos STL, corregir geometría corrupta utilizando filtros de limpieza y triangulación de VTK, y escalar los modelos a unidades estándar. A partir de un punto seleccionado por el usuario sobre la superficie del modelo, se generan defectos distribuidos aleatoriamente en un área determinada, mediante deformación local de los vértices de la malla según modelos matemáticos específicos para cada tipo (circular, banana, media luna, ovalado, montaña con cráter...).

En la Figura 3 se presenta un diagrama detallado del flujo interno del algoritmo de generación de defectos, desde la carga del modelo hasta la confirmación final de la malla modificada. La subdivisión adaptativa y el suavizado de la malla en las zonas afectadas se realiza con vtkLoopSubdivisionFilter y

vtkWindowedSincPolyDataFilter, garantizando una transición suave entre la geometría original y la zona modificada. Se incluye además una funcionalidad de previsualización de área afectada, así como herramientas de inspección y restauración de la malla original. La aplicación también admite el marcado visual de cada defecto generado para facilitar su análisis.

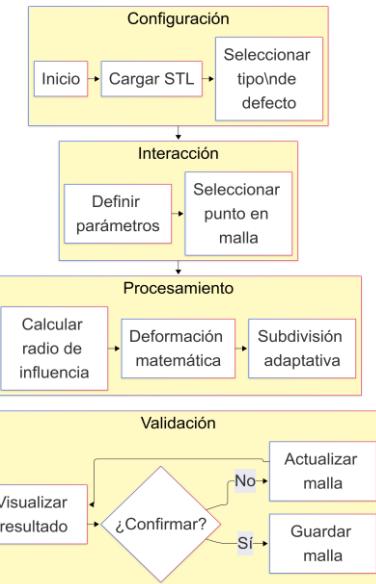


Figura 3: Flujo interno del algoritmo de generación de defectos

Toda la lógica está encapsulada en una clase principal que actúa como ventana de la aplicación, permitiendo una ejecución modular y reutilizable. Las pruebas funcionales se realizaron sobre distintos modelos STL de carrocerías reales, verificando la robustez del sistema ante errores geométricos y la capacidad de generar deformaciones consistentes.

4. Resultados

Con el objetivo de validar la funcionalidad y la robustez de la herramienta desarrollada, en términos de capacidad de generación de diferentes tipos de defectos y de deformación controlada de la malla original para insertar dichos defectos, se han llevado a cabo múltiples pruebas sobre modelos CAD de componentes reales de carrocerías, concretamente sobre un capó frontal y una puerta delantera de coche.

En la Figura 4 se muestra la interfaz principal de la aplicación durante una de las sesiones de prueba. En este caso, el usuario ha cargado un modelo STL representativo de una superficie de carrocería y ha seleccionado el tipo de defecto "Circular", configurando los parámetros geométricos de generación: un radio de 20 unidades, una amplitud de 3 unidades y un radio de deformación de 100 unidades. Estos valores definen el área y profundidad de los defectos que se aplicarán a la malla. La interfaz permite además establecer el número de defectos a generar, en este caso, cinco, así como visualizar la malla, guardar/restaurar vistas de cámara y aplicar herramientas de restauración o reparación de malla. El visor central 3D, basado en VTK, permite una navegación fluida y visualización detallada en tiempo real, facilitando al usuario la evaluación instantánea del resultado.

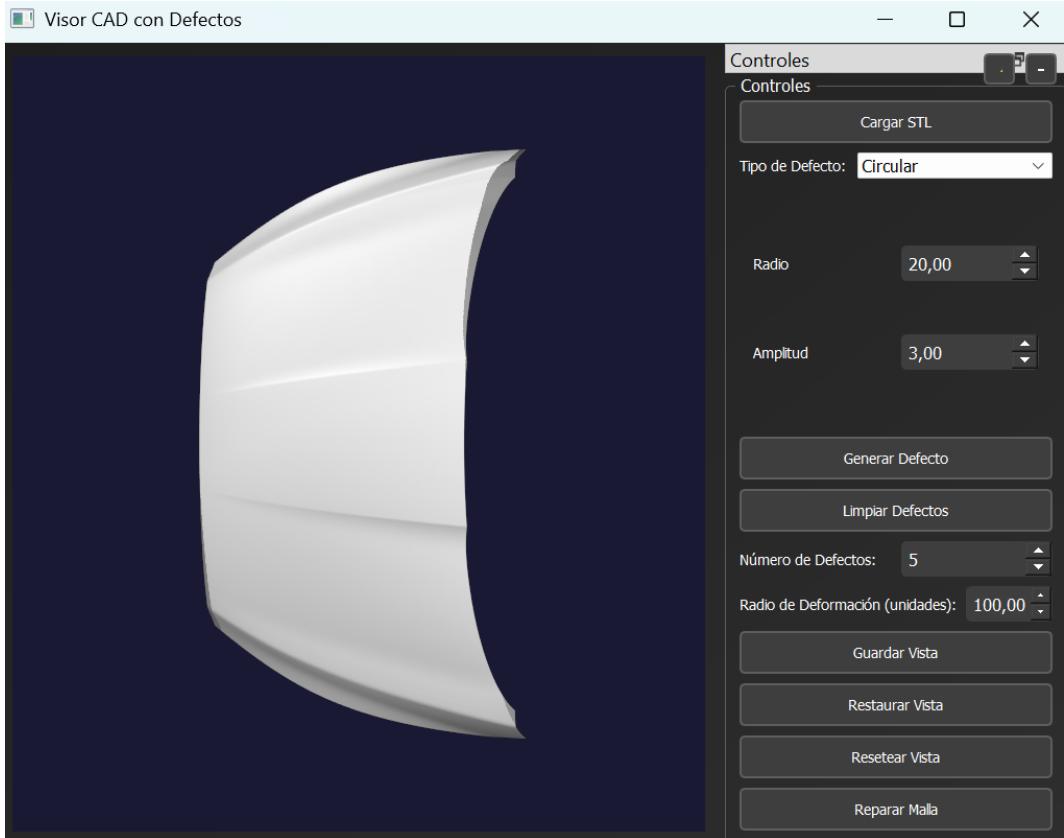


Figura 4: Interfaz gráfica de la herramienta con un modelo STL cargado y parámetros de defecto configurados

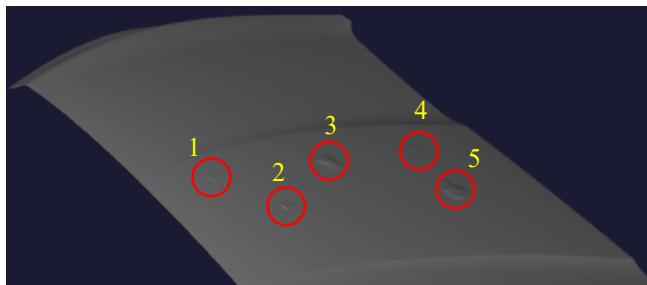


Figura 5: Resultado de la generación semiautónoma de defectos circulares sobre la superficie del modelo CAD

La Figura 5 ilustra el resultado tras la generación de los defectos sobre la superficie del capó. Como se puede observar, se han aplicado cinco deformaciones circulares, distribuidas aleatoriamente dentro del área especificada. Cada defecto se ha generado mediante la deformación localizada de vértices en la malla, siguiendo una función matemática previamente definida que simula abolladuras de forma realista. La herramienta garantiza que cada deformación conserve coherencia geométrica con el modelo original, integrando transiciones suaves entre zonas deformadas y no deformadas gracias al uso combinado de filtros de subdivisión adaptativa (`vtkLoopSubdivisionFilter`) y suavizado (`vtkWindowedSincPolyDataFilter`). Este proceso asegura que no se generen artefactos visibles ni discontinuidades bruscas en la malla, lo que es esencial para su posterior análisis en sistemas de inspección automatizada.

Los resultados confirman que la herramienta permite una generación eficiente y precisa de defectos artificiales, con un alto grado de parametrización y control por parte del usuario. Este comportamiento ha sido validado tanto visualmente como mediante la inspección estructural de las mallas modificadas, verificando que no se producen errores topológicos ni pérdidas de integridad en los archivos STL procesados. La capacidad de aplicar múltiples defectos en una misma sesión y de ajustar individualmente los parámetros para cada uno proporciona una gran flexibilidad para el entrenamiento de algoritmos de inspección, clasificación y reparación en entornos simulados.

Además, la interfaz permite iterar de forma rápida entre configuraciones distintas, lo que resulta fundamental para la fase de desarrollo y ajuste fino de estrategias de reparación automática mediante robots virtuales. Esta capacidad de simulación avanzada aporta un valor añadido significativo al permitir la validación previa en entorno virtual, sin necesidad de recurrir a ensayos físicos que serían costosos, lentos o incluso destructivos.

La herramienta presentada constituye un entorno eficaz y versátil para la generación de datos sintéticos de alta calidad, lo cual es fundamental para el entrenamiento supervisado de modelos de inteligencia artificial aplicados a la inspección superficial de carrocerías. La siguiente fase de desarrollo incluirá la incorporación de defectos de morfología más compleja y un sistema automático de etiquetado para facilitar su uso en flujos de aprendizaje automático.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta semiautónoma y completamente parametrizada para la generación de defectos sobre modelos CAD de carrocerías, con el objetivo de facilitar el desarrollo y validación de sistemas de inspección y reparación automática en entornos virtuales. La solución integra una interfaz gráfica intuitiva desarrollada en Python mediante PyQt5 y VTK, que permite cargar modelos STL, seleccionar parámetros geométricos, generar deformaciones localizadas y visualizar los resultados en tiempo real.

Gracias a su diseño modular y su capacidad de personalización, la herramienta permite simular una amplia variedad de defectos tanto micro como macroestructurales, replicando condiciones reales de producción en fases de tratamiento superficial como el lijado, el matizado o el pulido. La incorporación de técnicas de suavizado y subdivisión garantiza una deformación realista de la malla, manteniendo la integridad geométrica del modelo y permitiendo su uso posterior en sistemas de visión artificial e inteligencia artificial.

Los resultados obtenidos demuestran que la herramienta es robusta, versátil y efectiva para la generación controlada de datos sintéticos en procesos de inspección virtual. Su aplicación en entornos como ROS y Gazebo, en conjunto con gemelos digitales de robots industriales, sienta las bases para una implementación futura en sistemas físicos de reparación autónoma.

Como líneas futuras, también se plantea ampliar la tipología de defectos disponibles mediante modelos más complejos, así como la incorporación de defectos reales a partir de escaneos 3D de piezas dañadas, lo que permitiría enriquecer las simulaciones con datos reales, siempre que se disponga del equipamiento adecuado y conocimientos básicos de modelado 3D para su integración. De hecho, se prevé que la herramienta pueda ser utilizada por personal técnico con conocimientos básicos de CAD, sin necesidad de una formación intensiva, lo que facilitaría su integración en entornos de desarrollo y procesos industriales semi-automatizados. En este sentido, se explorará la integración de operadores humanos en fases de ajuste y validación mediante

un enfoque human-in-the-loop, así como el uso de técnicas de visión por computador e inteligencia artificial para mejorar la detección y clasificación de defectos reales, así como algoritmos de priorización de defectos según características como tamaño, forma o posición, con el objetivo de optimizar el proceso de reparación.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, Agencia Estatal de Investigación (Gobierno de España), a través del proyecto PID2023-146747NA-C22, y por la Comisión Europea con fondos MRR (101083002).

Referencias

- Bogue, R., 2013. Robotic vision boosts automotive industry quality and productivity. *Industrial Robot*, Vol. 40, No. 5, pp. 415-419. doi.org/10.1108/IR-04-2013-342
- Chatzilygeroudis, K., Mayr, M., Fichera, B., & Billard, A. (2019). iiwa_ros: A ROS Stack for KUKA's IIWA robots using the Fast Research Interface. GitHub. http://github.com/epfl-lasa/iiwa_ros
- Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T., Ulf Müller, C., 2025. Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, Vol. 26, p. 200516. doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516.
- Garcia, A., Gracia, L., Solanes, J. E., Girbés-Juan, V., Perez-Vidal, C., & Tornero, J., 2021. Robotic assistance for industrial sanding with a smooth approach to the surface and boundary constraints. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 158, p. 107366. doi.org/10.1016/j.cie.2021.107366
- Mohsen, S., Behrooz, A., Roza, D., 2023. Digital twin for smart manufacturing. A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, Vol. 2, p. 100017. doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017.
- Morales Matamoros, O., Takeo Nava, J.G., Moreno Escobar, J.J., y Ceballos Chávez, B.A. 2025. Inteligencia Artificial para Defectos de Calidad en la Industria Automotriz: Una Revisión Sistémica. *Sensors*, Vol. 25, No. 5, p. 1288. doi.org/10.3390/s25051288
- Shahria, MT, Sunny, MSH, Zarif, MII, Ghommam, J., Ahmed, SI y Rahman, MH, 2022. Una revisión exhaustiva de las aplicaciones robóticas basadas en visión: Estado actual, componentes, enfoques, obstáculos y posibles soluciones. *Robótica*, Vol. 11, No. 6, p. 139. doi.org/10.3390/robotics11060139