

## Integración y gestión por computadora de sistema automatizado para la ejecución de tarea de pintado

## Integration and management by computer of automated system for the performance of painting task

RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo†\*, CARREÓN-MÁRQUEZ, Diego César, RODRÍGUEZ-LOMELÍ, José Alberto y FELICIANO-VELÁZQUEZ, Néstor David

*Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Martín Eduardo, Rodríguez-Franco* / **ORC ID:** 0000-0002-6804-4777, **Researcher ID Thomson:** T-1539-2018, **CVU CONACYT ID:** 660892

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Diego César, Carreón-Márquez* / **ORC ID:** 0000-0002-6465-7293, **OPEN ID:** 102596840636946943822, **CVU CONACYT ID:** 1047983

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *José Alberto, Rodríguez-Lomelí* / **ORC ID:** 0000-0003-3897-150X, **OPEN ID:** 109058887617333264393, **CVU CONACYT ID:** 1047920

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Néstor David, Feliciano-Velázquez* / **ORC ID:** 0000-0001-7060-641X, **OPEN ID:** 101253670055995094901, **CVU CONACYT ID:** 1048629

**DOI:** 10.35429/JSI.2020.13.4.14.20

Recibido Enero 18, 2020; Aceptado Marzo 31, 2020

### Resumen

Este trabajo expone la implementación de un robot en configuración angular para el desempeño de la tarea de pintado de superficies; a partir del acondicionamiento de una herramienta de aspersión en su efector final. El monitoreo y control del robot son realizados mediante la integración de un sistema de regulación articular, basado en la resolución cinemática correspondiente, en comunicación con una interfaz por computadora, desarrollada a partir del software LabVIEW. Se contempla una operación de inspección de producto finalizado, cuya función recae sobre un sistema de visión adicionado a la misma interfaz de gestión. La propuesta de una trayectoria en el efector final que siga la forma exterior del objeto a pintar en combinación con el control de giro de una mesa giratoria, sobre la cual tal objeto permanece durante el proceso, ha permitido describir una mínima cantidad de ejecuciones de la secuencia de pintado para cubrir la totalidad de su superficie; arrojando resultados positivos. Se concluye en la conveniencia de esta implementación con orientación industrial, al conjuntar conocimientos teórico-prácticos esenciales en Ingeniería.

**Tarea de pintado, Sistema robótico, Sistema de visión por computadora**

### Abstract

This paper exposes the implementation of a robot in angular configuration for the performance of surface painting task, since the conditioning of a spraying tool in its end effector. Robot monitoring and control are executed by integrating a joint regulation system, based on the corresponding kinematic resolution, in communication with a computer interface, developed from LabVIEW software. A finished product inspection operation is contemplated, whose function is performed by a vision system added to the same management interface. The proposal of a trajectory in the end effector that imitates the external shape of the object to be painted in combination with the rotation control of a rotating table, on which such object remains during the process, has allowed to describe a minimum quantity of executions of the painted sequence to cover its entire surface; showing positive results. It is concluded in the convenience of this implementation with industrial orientation, by combining theoretical and practical knowledge essential in Engineering.

**Painting task, Robotic system, Computer vision system**

**Citación:** RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo, CARREÓN-MÁRQUEZ, Diego César, RODRÍGUEZ-LOMELÍ, José Alberto y FELICIANO-VELÁZQUEZ, Néstor David. Integración y gestión por computadora de sistema automatizado para la ejecución de tarea de pintado. Revista de Innovación Sistemática. 2020. 4-13:14-20.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: martin.rodriguez@utna.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Desde una perspectiva funcional, la pintura no únicamente dota al elemento sobre el cual se aplica, de una apariencia estética o con calidad a la vista, sino también brinda protección mecánica ante la corrosión y las condiciones del clima (Giamperi, et al., 2020) (Zhang, et al., 2016). En la actualidad, la técnica más empleada en la ejecución del proceso de pintura industrial, y en específico, automotriz, es la deposición y el curado. El primer proceso produce una capa muy uniforme en la superficie del objeto intervenido (Ju, et al., 2013), mientras el segundo proceso provee la adhesión permanente de la pintura mediante la aplicación de calor (Akafuah, et al., 2016). Ambos procesos son ejecutados dentro de ambientes cuyas condiciones son altamente controladas.

Necesidades emergentes de los procesos de pintura industrial apuntan a la reducción en el consumo de energía empleada (Giamperi, et al., 2020), la minimización en la emisión de partículas contaminantes (Rivera & Reyes-Carrillo, 2014) y el aumento en la eficiencia del proceso de transferencia y adhesión (Schulz, 2013), principalmente; un reto digno para la planeación de procesos inteligentes dentro de las denominadas “fabricas digitales”. Este término ha sido acuñado para referirse a procesos altamente automatizados y gestionados en forma remota, desde dispositivos móviles con acceso a Internet (Endregaard, 2002). La particularidad de tal despliegue de tecnología en los procesos industriales, promovida por la Industria 4.0, es efficientar su desempeño, optimizar el uso de recursos y conocer, en todo momento, la condición del mismo (Bysko, Krystek & Bysko, 2020).

Las características expuestas con anterioridad hacen del análisis a este tipo de procesos, una aplicación interesante desde el punto de vista académico y de investigación, a partir del cual, sea posible sintetizar y proponer metodologías que provean una mejora en su consecución y en el aprovechamiento de los elementos empleados.

## Antecedentes

La constante transformación industrial ha llevado a la innovación y optimización de los múltiples procesos ejecutados dentro de una empresa; un área clave en éstos, tal como es la manufactura, se ha visto envuelta en una actualización (Endregaard, 2002). Es así, que en hoy en día, la constitución de adecuados sistemas mecánicos que brindan sustento a un implemento, son un elemento dentro de un gran conjunto que implica una interacción con otras disciplinas tales como la electrónica, la computación y el control; lo que permite otorgar autonomía a sus funciones y el principio de la integración de máquinas inteligentes.

El área de pintado no es la excepción dentro de esta transformación, puesto que la aplicación de la robótica ha sido determinante para alcanzar estándares de calidad que originalmente eran impensables, adecuando los métodos empleados para la ejecución de una tarea rápida, limpia y de muy alta precisión (Pendar & Páscoa, 2019) (Zhang, et al., 2020), razón del presente estudio. Desde el punto de vista tecnológico, es necesario comprender un proceso para realizar alguna mejora en el mismo. Por lo cual, se ha despertado la curiosidad para analizar detalles de la operación de pintura industrial, con la finalidad de adaptar la teoría abordada durante la formación profesional en Mecatrónica para simular su acción, y de ser posible, orientar esfuerzos en focalizar áreas de oportunidad.

## Características del prototipo físico

Se parte del desarrollo y la implementación de un prototipo físico que consta de un robot en configuración angular con tres grados de libertad, en cuyo efector final fue adaptado un aplicador presurizado de pintura, como se muestra en la figura 1. Además, de adaptar una mesa rotatoria a este conjunto, con la finalidad de otorgar uniformidad en la aplicación de pintura sobre el objeto intervenido, en este caso piezas de barro, al rotar un determinado valor en grados proporcional a la cobertura alcanzada por la pintura al ser esparcida.



**Figura 1** Prototipo físico  
Fuente: elaboración propia

Cabe mencionar, que los actuadores empleados para dotar de accionamiento a los sistemas móviles fueron motores de corriente directa, en el caso de las articulaciones del robot; mientras que para la mesa rotatoria se empleó un motor a pasos. El tipo de actuador adaptado al robot permitió la posterior implementación de sistemas de control en lazo cerrado para asegurar el posicionamiento preciso de éste en una localización espacial especificada por el usuario.

Mientras que, para la mesa, en la cual no era necesaria una alta precisión en la posición alcanzada, únicamente resultó necesario preservar una cantidad similar en el avance que la misma iba teniendo al ejecutar su rotación, por tanto, se optó por el motor a pasos al brindar tales características de desempeño.

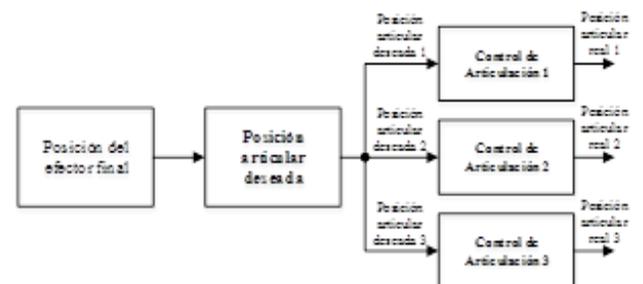
### Sistemas de control articular

Con la finalidad de cubrir la tarea de control tanto del robot como de la mesa giratoria empleada, fueron desarrollados controladores que llevaron la gestión de movimiento de cada articulación en el caso del primero y de la rotación de la segunda.

Cabe mencionar, que la aplicación de tales controladores principió con el uso de dispositivos analógicos como lo son amplificadores operacionales, mismos que luego fueron sustituidos por tarjetas electrónicas que, a través de la programación de un algoritmo de control, constituyeron un medio digital para el control de los sistemas mencionados.

Técnicas de control basadas en la suma de las acciones proporcional integral derivativa (PID) fueron consideradas para lograr un grado de manipulación adecuado del robot en su conjunto, lo cual es posible a través de la valoración de señales de referencia dadas para el posicionamiento de cada articulación en una localización espacial específica, así como la retroalimentación de las señales reales pertinentes que constataron el valor de tal ubicación.

De esta manera, un controlador PID promueve la mejora en la respuesta del sistema al cual sea aplicado, al disminuir el tiempo de elevación mediante la acción proporcional, reducir el tiempo de asentamiento y la magnitud del sobre impulso que pueda hacerse presente por medio de la acción derivativa y eliminar el error, a través de la acción integral (Somwanshi, Bundele, Kumar, & Parashar, 2019). La sinergia entre sistemas articulares del robot y las señales que permiten su funcionamiento se presentan en la figura 2.



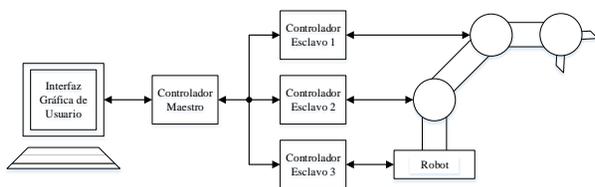
**Figura 2** Flujo de control para el robot  
Fuente: elaboración propia [Microsoft Visio]

El funcionamiento adecuado de los controladores empleados sólo fue posible, al aplicar metodologías de sintonización tales como la curva de reacción de Ziegler-Nichols, cuya respuesta fue mejorada por acción de algoritmos computacionales, programados en tarjetas electrónicas empleadas, los cuales propiciaron un desempeño apropiado. La señal de control deducida para cada articulación era destinada hacia una etapa de potencia independiente, cuya función es la adaptación de la corriente necesaria para efectuar una modificación en el comportamiento de cada actuador, según fuera requerido dada la posición espacial solicitada en el efector final.

### Sistema de comunicación

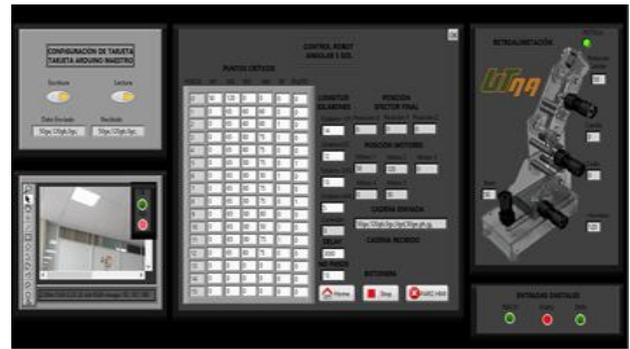
Las tarjetas controladoras, además de contener la programación para la regulación del posicionamiento de cada motor, también fueron dotadas para establecer comunicación con una interfaz gráfica integrada dentro de una aplicación por computadora, en este caso, un instrumento virtual desarrollado en el software LabVIEW. Asimismo, fue necesaria la conformación de una red para la gestión de la información entre los dispositivos empleados, adoptando una comunicación de tipo Maestro/Eslavo entre tarjetas controladoras, según se presenta en la figura 3.

Esta arquitectura cumpliría las funciones de distribuir la información proveniente de la interfaz por computadora y de concentración de los datos procedentes de cada sistema de control independiente, para realizar su retroalimentación hacia la misma interfaz.



**Figura 3** Estructura del sistema de comunicación  
Fuente: elaboración propia [Microsoft Visio]

A partir de la constitución de tal utilidad de control y monitoreo, fue posible el envío de las consignas de movimiento a cada uno de los actuadores de una manera coordinada. Lo anterior, puesto que, por el tipo de tarea a ejecutar, fue necesaria la descripción de un desplazamiento simultáneo de los motores al ejercer una rutina de pintura. Asimismo, la interfaz implementada cuenta con elementos que permiten visualizar, en una forma muy acercada al tiempo real, la evolución que va teniendo el movimiento articular, lo cual brinda certeza durante la ejecución de la tarea desarrollada, según se expone en la figura 4.



**Figura 4** Interfaz de gestión en LabVIEW  
Fuente: elaboración propia [LabVIEW]

### Generación de trayectorias

El movimiento simultáneo de actuadores fue logrado a través de un proceso de planeación de trayectorias robóticas que cubrieran desplazamientos para mantener el extremo del aplicador de pintura siempre a la misma distancia, o una distancia regular muy aproximada, del elemento a pintar; esto con la finalidad de ejecutar una operación de pintado lo más uniforme posible.

Por lo cual, fue necesaria la adecuación de las trayectorias propuestas a las formas disruptivas de la geometría del objeto a pintar; siendo previamente caracterizadas algunas dimensiones del objeto, para realizar una propuesta de desplazamientos que buscara además cubrir la mayor área con pintura en la menor cantidad de movimientos posibles, como se muestra en la figura 5.

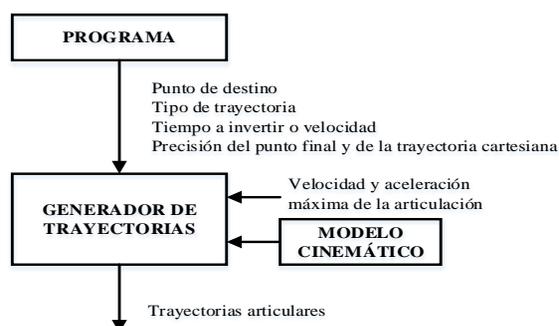


**Figura 5** Trayectoria propuesta para el proceso de pintura  
Fuente: elaboración propia

Para lograr la descripción de trayectorias, fue necesario el empleo de interpoladores generados por la misma interfaz de control, en combinación con el análisis de la cinemática inversa de la configuración robótica implementada, según se expresa en la figura 6.

En conjunto, tal análisis llevó a la deducción de las coordenadas cartesianas del efector final (en los ejes X, Y, Z) dado un movimiento específico de cada actuador, para buscar el posicionamiento requerido del aplicador de pintura en todo momento.

Para lograr tal cometido, se tuvieron que delegar adecuadamente las funciones realizadas directamente por cada controlador de articulación y aquellas emprendidas por la interfaz gráfica de gestión, respecto al control ejercido sobre el robot.



**Figura 6** Relación entre el modelo cinemático y la generación de las trayectorias  
*Fuente: Barrientos, et al., 2007*

### Sistema de inspección por computadora

La adaptación de un sistema de visión por computadora (figura 7), el cual fungió como elemento para la gestión en la calidad del objeto procesado, permitió identificar si éste contaba con las características adecuadas de cobertura de superficie propias, después de la ejecución de la operación de pintado, o sería necesaria la aplicación de nuevas capas.

Para lograr tal función, a la interfaz para la gestión del sistema por computadora le fue acondicionado el uso de una cámara USB, cuya acción se centró en la identificación del color de la pieza antes y después de ser procesada, para diferenciar el estatus de la misma, y ejercer el proceso de pintura en caso de que el objeto no hubiese sido intervenido, o cesar su acción, una vez revestida con pintura la totalidad de la superficie del objeto.



**Figura 7** Interfaz para inspección del proceso de pintura  
*Fuente: elaboración propia [LabVIEW]*

Realizándose la activación del proceso de pintura al ser detectada, por el sistema de visión, una pieza cuyo color original o base no coincidiera con aquel determinado para la presentación final del objeto intervenido. Fue en este punto que, en búsqueda de lograr los objetivos de uniformidad, limpieza y precisión en el proceso de pintura, se realizó la adaptación de la mesa rotatoria sobre la cual descansaba el objeto intervenido durante su procesamiento, según se aprecia en la figura 8. Tal mesa gira para permitir que el robot describa siempre un mismo tipo de trayectoria, de una manera repetida, hasta alcanzar la cobertura total de la pieza con pintura.



**Figura 8** Mesa giratoria con pieza  
*Fuente: elaboración propia*

### Resultados de operación del sistema

El empleo de un robot en configuración angular, para la ejecución de la tarea de pintado, ha provisto el posicionamiento de la herramienta de aplicación de pintura en puntos estratégicos que llevan a imitar la forma exterior del objeto intervenido. Lo anterior ha sido posible mediante el empleo del análisis cinemático respectivo, y a partir de éste, la propuesta de trayectorias para el ciclo de operación.

Es así, que la herramienta es conducida desde una posición de reposo hacia una posición de inicio de operación, en la cual el aplicador de pintura es activado, para describir el contorno exterior del objeto procesado, llegando a un punto de finalización de la operación, para retornar a tal herramienta a su posición de reposo, en espera de una nueva ejecución.

Tal condición ha significado la propuesta y preservación de una distancia apropiada entre ambos elementos: aplicador y objeto, con la finalidad de otorgar una relación adecuada entre la pintura esparcida y aquella captada en la superficie. Una ventaja de este proceder ha sido la mitigación de la acumulación de exceso de pintura en áreas con cierta concavidad, tal como el cuello del objeto como se muestra en la figura 9, lo que lleve al desperdicio de ésta y posibles afectaciones sobre la mesa giratoria.

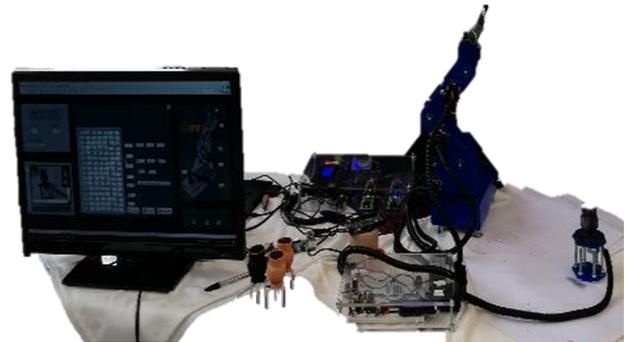


**Figura 9** Aplicador en función y cuello del objeto  
Fuente: elaboración propia

Es de resaltarse, la acción del sistema de visión por computadora integrado para el correcto desempeño de la operación de pintado. Puesto que, la función del prototipo no iniciaba sino a partir de la detección de pieza que requiriera ser sometida a tal operación. Por lo cual, para arrancar el proceso no bastaba con energizar el prototipo, ni presionar el botón de arranque dispuesto, sino que el sistema de visión detectará pieza presente sobre la mesa rotatoria, y por supuesto, esta pieza fuera del color original.

Cabe mencionar, que, una vez finalizado un ciclo de operación de pintado, si se decidía dejar a la pieza procesada sobre la mesa giratoria, su detección por parte del sistema de visión no provocaría el reinicio de tal operación; esto como efecto del color detectado en su superficie.

Por lo cual, la función del prototipo sería reiniciada hasta que la pieza procesada fuera retirada de la mesa giratoria y en su lugar, fuera colocada una pieza sin procesamiento previo. El conjunto del prototipo implementado y en funcionamiento se aprecia en la figura 10.



**Figura 10** Conjunto de prototipo e interfaz en operación  
Fuente: elaboración propia

## Conclusiones

El desarrollo de la presente aplicación constata su pertinencia como un elemento de estudio en cual convergen múltiples disciplinas de la ingeniería, por lo cual, su esencia mecatrónica es totalmente innegable. Asimismo, la orientación hacia la comprensión de un proceso industrial poco explorado desde la perspectiva académica y de investigación, como es pintura, convirtió a esta tarea en un reto para los ejecutantes, al buscar empaparse de los elementos requeridos para llevar al estudio y posterior implementación de un prototipo funcional que conjuntase las características básicas de tal proceso.

Finalmente, es posible adicionar más conocimiento en la optimización de los comportamientos alcanzados durante la fase de pruebas, con lo cual sea posible la obtención de un modelo con grandes similitudes al proceso real y que brinde al estudiante de Mecatrónica una noción básica de las implicaciones del conocimiento adquirido para con dicha área, como una opción para su ejercicio profesional.

## Referencias

- Akafuah, N. K., et al. (2016). Evolution of the automotive body coating process– a review. *Coatings*. 1-22.
- Barrientos, A., et al. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

Bysko, S., Krystek, J., & Bysko, S. (2020). Automotive paint shop 4.0. *Computers & Industrial Engineering*. 1-13.

Endregaard, E. A. (2002). Paint robotics—improving automotive painting performance. *Metal Finishing*. 8-13.

Giamperi, A., et al. (2020). A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*. 1-29.

Ju, F., et al. (2013). Modeling quality propagation in automotive paint shops: an application study. *IFAC Proceedings Volumes*. 1890-1895.

Pendar, M.-R., & Páscoa, J. C. (2019). Numerical modeling of electrostatic spray painting transfer processes in rotary bell cup for automotive painting. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1-26.

Rivera, J., & Reyes-Carrillo, T. (2014). A framework for environmental and energy analysis of the automobile painting process. *Procedia CIRP*. 171-175.

Schulz, D. (2013). Painting trends in the automotive industry. *Metal Finishing*. 38-40.

Somwanshi, D., Bundele, M., Kumar, G., & Parashar, G. (2019). Comparison of fuzzy PID and PID controller for speed control of DC motor using LabVIEW. *Procedia Computer Science*. 252-260.

Zhang, B., et al. (2020). Accurate dynamic modeling and control parameters design of an industrial hybrid spray-painting robot. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 1-13.

Zhang, N., et al. (2016). Characterization of automotive paint by optical coherence tomography. *Forensic Science International*. 239-244.