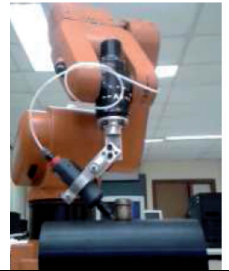


Programación de una célula robotizada para soldadura de complementos a depósitos de acero a presión

PROGRAMMING A ROBOTIC CELL APPLIED TO THE WELDING ACCESSORIES TO PRESSURIZED STEEL TANKS



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7154> | Recibido: 06/05/2014 • Aceptado: 18/09/2014

■■■■
Ana Cristina Majarena-Bello, Francisco Javier Brosed-Dueso, Arturo Suelves-Albert, Jorge Santolaria-Mazo
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Dpto. Ingeniería de Diseño y Fabricación. Edif. Torres Quevedo. EINA. c/ María de Luna, 3 - 50018 Zaragoza. Tfno: +34876555453. majarena@unizar.es

ABSTRACT

• Welded steel tanks are pressure containers whose function is to store a pressure fluid. Nowadays, industrial robots develop a very important work in the industry, and especially in welding systems. The automation of welding processes has many advantages. However, programming of the control system to change production models remains difficult and requires a lot of time.

The objective of this work is to develop a methodology to program the control system of a robot welding in a simple and quick way for a considerable time saving. To do this, from the definition of the layout of the welding cell, a method to systematize the process of obtaining the programs has been developed so that the robot cell perform the welding process of the elements connected to the ferrule of the tank. The method consists of defining a structured data with a geometric description of the tank and the parameters of the welding process. The method adds the calculated data to a file using several computer programs that allow the robot cell perform welding paths. These data are the points and orientations of the end effector and robot coordinates joint obtained by the Denavit - Hartenberg method. The generated data file is then loaded into the simulation environment of the robot to verify the paths and make corrections. Once validated the simulation program, the robot program is generated and automated welding is performed. The programs have been generated in a parameterized way, so changing them is simple and quick.

• **Keywords:** robotic cell, robot programming, welding, pressurized steel tanks, control system.

RESUMEN

Los depósitos de acero soldado son recipientes a presión cuya función es la de almacenar un fluido a presión manométrica. En la actualidad los robots industriales desarrollan una labor muy importante en la industria, y muy especialmente en los sistemas de soldadura. La automatización de los procesos de soldadura presenta múltiples ventajas. Sin embargo, la programación del sistema de control para cambiar los modelos de producción sigue siendo difícil y requiere un tiempo elevado. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología que permita programar el sistema de control de un robot de soldadura de una manera sencilla y rápida, obteniendo un considerable ahorro de tiempo. Para ello, a partir de la definición del layout de la célula de soldadura, se ha desarrollado un método para sistematizar el proceso de obtención de los programas de forma que el robot de la célula realice la soldadura de los elementos conectados a la virola de los depósitos.

Dicho método consiste en la creación de un fichero estructurado de datos con una descripción geométrica del depósito y los parámetros del proceso de soldadura. El método añade al fichero los datos calculados mediante una serie de programas informáticos que permitirán al robot de la célula realizar las trayectorias de soldadura. Estos datos son los puntos y orientaciones del extremo efector y las coordenadas articulares del robot, obtenidos mediante el método de *Denavit-Hartenberg*. Posteriormente el fichero de datos generado se carga en el entorno de simulación del fabricante del robot para poder verificar la validez de los movimientos y realizar correcciones. Una vez validado el programa de simulación, se genera el programa del robot y se realiza la soldadura de forma automatizada. Los programas se han generado de forma parametrizada, por lo que la modificación de los mismos es sencilla y rápida.

Palabras clave: célula robotizada, programación de robots, soldadura, depósitos de acero a presión, sistema de control.

1. INTRODUCCIÓN

Los depósitos de acero a presión se utilizan en múltiples industrias como las químicas [1], hidrocarburos [2], petroleras [3], alimenticias [4], etc., desempeñando diversas funciones como reactores (donde se producen transformaciones químicas normalmente en condiciones severas de temperatura y presión), torres (donde se producen transformaciones físicas como la separación de componentes ligeros y pesados, arras-

tre con presión o absorción), depósitos (donde pueden producirse transformaciones físicas como separación de líquido-vapor, separación de dos líquidos no miscibles con diferentes densidades) o acumuladores (realizando la función de acumulación de fluidos). Dichos depósitos suelen ser cilíndricos y están contruidos a partir de dos fondos embutidos y una virola de chapa curvada, unidos entre sí mediante cordones de soldadura. Posteriormente, en las virolas de los depósitos se sueldan elementos de conexión tales como racores (entradas y salidas de fluido), bridas para limpieza, colocación de aparatos de control o vainas para la colocación de elementos de medición (sondas de temperatura, ánodos de sacrificio), así como soportes de sujeción, patas de apoyo, orejetas de suspensión, etc. [5].

Estas uniones se pueden realizar mediante soldadura manual, utilizando autómatas programables o mediante robots industriales. La fabricación de los depósitos a presión es un proceso que depende mucho de la calidad de las soldaduras, ya que una mala soldadura puede provocar problemas de fugas de fluido, corrosión, malos ajustes de conexión, etc. [6]. La automatización de la soldadura de estos depósitos elimina errores humanos y conlleva un considerable ahorro de tiempo.

Los robots industriales desarrollan una labor muy importante en la industria [7]. En concreto, la industria metal-mecánica ha experimentado profundos cambios en cuanto a la mejora de procesos productivos gracias a la utilización de estos sistemas.

evitar colisiones con otros objetos en el espacio de trabajo [9]. Existen publicaciones donde se presenta la automatización de los diferentes procesos. Así, por ejemplo, en [10] se desarrollan diferentes soluciones automatizadas para la preparación de los elementos a soldar mediante la utilización de estaciones robotizadas. En [11], se presenta la secuenciación y la ruta de planificación en las células de soldadura robótica. En [12] se analizan diferentes técnicas para mejorar la productividad y la calidad de una célula robotizada para la fabricación de soldadura MIG/MAG. En este trabajo se analiza la influencia de los parámetros de soldadura para chapas de 5 y 6 mm de espesor. Diferentes técnicas basadas en sensores de visión por computador se analizan en [13] para realizar la programación automática de la ruta de soldadura y la determinación de los parámetros técnicos que permiten orientar y hacer un seguimiento de la costura.

Sin embargo, la obtención de importantes mejoras en cuanto a flexibilidad, productividad y calidad mediante la utilización de robots automatizados en tareas de soldadura no es una tarea fácil, ya que requiere el análisis de la configuración del proceso y un amplio trabajo de programación para garantizar que el sistema funciona como era de esperar con la calidad requerida [14]. Este proceso es una tarea compleja que requiere elevado tiempo y personal experimentado, por lo que sigue siendo uno de los grandes retos en la automatización para pequeñas y medianas empresas [15,16]. Existen trabajos publicados con aplicaciones que generan trayectorias

PROGRAMACIÓN DEL ROBOT: EN LÍNEA, FUERA DE LÍNEA

La programación del robot se puede realizar en línea o fuera de línea [7].

En la programación en línea se trabaja directamente con el robot, ya que debe realizar la tarea registrando las posiciones adoptadas para su posterior repetición en forma automática. Esta información se puede introducir de diversas formas:

1. Programación en "playback". Mediante este método, el robot se lleva a mano a las posiciones a las que deberá ir en automático y las va guardando mediante un pulsador o de forma automática.
2. Programación mediante aprendizaje ("Teach-In"). En este caso se lleva al robot a los puntos de trabajo moviendo los distintos ejes mediante el ratón del mando manual, el joystick o las correspondientes teclas.

Algunas de las ventajas de la programación en línea es que son fáciles de aprender. Sin embargo, es necesario utilizar al propio robot y su entorno para realizar la programación, por lo que se debe detener la línea de producción para programarlo o para modificar los programas.

Mediante la programación fuera de línea se indica la tarea al robot a través de un lenguaje de programación específico.

La información sobre dónde están los puntos a los que debe ir la herramienta se le proporciona mediante coordenadas cartesianas X, Y, Z y la orientación de la herramienta con tres ángulos (A, B, C en KUKA; W, P, R en FANUC; cuaterniones en ABB) las cuales se introducen mediante un lenguaje de programación.

La ventaja principal de este método es que la programación puede hacerse sin que el robot deje de trabajar en la planta de producción.

Por ello, la automatización está siendo uno de los grandes campos de interés en este sector, principalmente en los sistemas de soldadura, manipulación de materiales, mecanizado y montaje [8]. Además, el control de la trayectoria en los robots industriales, y muy especialmente en los procesos de soldadura, es una tarea indispensable para realizar la operación y

en tiempo real a partir de la detección, mediante sistemas de visión industrial, de la unión [17-19]. Estos sistemas, en general, pueden disminuir los errores de posicionamiento del robot respecto de la unión y pueden utilizarse para mejorar las prestaciones del robot una vez programado.

Los fabricantes de depósitos ofrecen una amplia variedad

de modelos para diversos cometidos. Muchos de ellos presentan la posibilidad de realizar modificaciones o personalizaciones en sus productos. Todo ello implica la necesidad de planificar la producción de sus productos por lotes. Esto conlleva el diseño de células de fabricación flexibles. Sus sistemas de control deben ser también flexibles para poder cambiar rápidamente de modelo a fabricar o para obtener nuevas programaciones de modelos nuevos. Sin embargo, en las empresas del sector, la modificación del sistema de control no es una tarea sencilla de realizar, ya que requiere generar de nuevo los programas de control de los robots mediante la medición de los nuevos puntos de soldadura o la programación de los puntos mediante aprendizaje del robot para que posteriormente el robot pueda realizar la soldadura de forma automática. Y aunque como se ha comentado previamente, existe bibliografía relacionada con la automatización de los procesos de soldadura, no se han encontrado trabajos relacionados con la sistematización de esta automatización. El presente trabajo es el primero en desarrollar una metodología para la programación parametrizada de la trayectoria del robot que incluye los cálculos matemáticos para la obtención de dicha trayectoria.

El objetivo principal del trabajo ha sido desarrollar una metodología que permita obtener de forma automática los programas de control necesarios para que el robot realice la soldadura. Esta metodología permite generar nuevos programas de forma rápida y sencilla, para obtener nuevos modelos o modificar los ya existentes, ya que se automatiza la generación del programa a partir de un fichero con los datos geométricos. Ello se consigue realizando una programación parametrizada del diseño de los elementos.

Otra forma de mejorar el error de posicionamiento del robot es a partir de la identificación de los parámetros de su modelo a través de un procedimiento de calibración para su posterior compensación [20]. La herramienta presentada en este trabajo aporta flexibilidad al proceso productivo al dismi-

nuir el tiempo de programación y posibilita la incorporación de modelos optimizados del robot (a partir de la calibración) en el módulo de cálculo de las coordenadas del robot. La combinación de la herramienta de programación avanzada presentada con los resultados de una calibración del robot amplía el campo de aplicación de la herramienta a casos en los que se requiera una mejora de la precisión del robot.

La metodología desarrollada se ha aplicado en una célula teórica simulada. Tradicionalmente este tipo de procesos en la industria se lleva a cabo de forma manual debido al tamaño de lote normalmente reducido de las series. El proceso de automatización cobra especial sentido para grandes series o en situaciones como las presentadas en este artículo, en el que se desarrolla una parametrización ofreciendo gran flexibilidad, ya que permite justificar el coste de la preparación. La programación parametrizada que se presenta, además de poder utilizarse para grandes series de un modelo dado, permite fácilmente realizar modificaciones de algunas variables para cambiar de modelo aportando gran flexibilidad al proceso.

En este trabajo, en primer lugar se define el caso de estudio. Posteriormente se analiza el proceso de soldadura de los elementos en los depósitos y se define el layout de la célula. Finalmente, se desarrolla una nueva metodología que permite realizar la programación del sistema de control de la célula robotizada de soldadura de una manera sencilla y rápida, permitiendo realizar modificaciones para familias de piezas. Esta metodología incluye los cálculos matemáticos para la obtención de las trayectorias del robot, generación de un fichero de simulación para la verificación de los movimientos del robot y generación del fichero del robot para la ejecución de la trayectoria. El hecho de que flexibilice el proceso productivo lo hace especialmente indicado a la práctica industrial, dado que cada vez más se requieren series cortas y modificaciones de los productos.

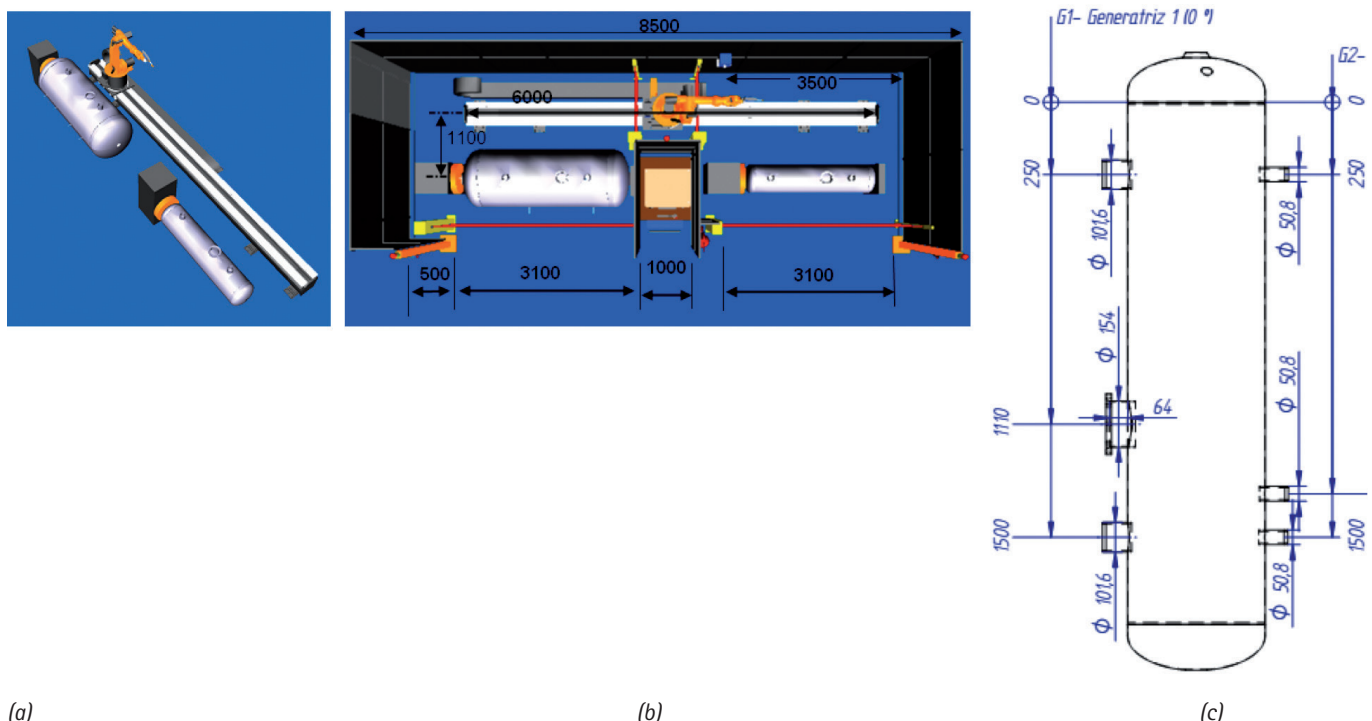


Fig. 1: Célula de fabricación flexible: (a) Diseño de la célula (b) Dimensiones de la célula (c) Localización de los componentes

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo presentado se centra en la generación automática del programa de control que gestiona los movimientos de los diferentes elementos de una célula de soldadura. Como ejemplo se ha simulado una célula de soldadura para la que se ha generado de forma automática, a partir de un fichero de datos de los depósitos, el programa que controla los movimientos de sus elementos. En los siguientes subapartados se describe la célula y la metodología desarrollada.

2.1. DEFINICIÓN DE LA CÉLULA ROBOTIZADA FLEXIBLE

Un depósito de acero a presión se utiliza para contener un fluido, líquido o gas a unas condiciones de temperatura y presión determinadas.

Se ha modelado una célula de fabricación para realizar la soldadura de los diferentes elementos a la virola del depósito. Este modelo se ha llevado a cabo como ejemplo de la aplicación del método para sistematizar la programación de robots.

En la Fig. 1 se muestra la distribución en planta de los diferentes elementos de la misma. La célula diseñada tiene unas dimensiones de 8.5 x 3 m en planta y una altura de 2.2 m y consta de dos puestos de trabajo aislados entre sí para que un operario pueda trabajar en uno de ellos (sujetando el cuerpo de los depósitos a los utillajes) mientras el robot suelda los diferentes elementos (racores, bridas, etc.) en el otro puesto, de este modo se puede mejorar la productividad. La virola de los depósitos está previamente unida a dichos elementos mediante punteado. Cada puesto de trabajo de la célula está compuesto por un posicionador sobre el que el operario coloca el depósito (1 y 2 en la Fig. 2). El posicionador es una mesa giratoria que se programa como un eje externo desde el programa del robot (el robot y los ejes externos utilizan el mismo controlador).

La Fig. 2 y la Tabla 1 muestran los componentes utilizados en el diseño de una célula robotizada de soldadura, así como la disposición final en la célula.

El posicionador gira el depósito para colocarlo en la posición adecuada permitiendo, de este modo, que el robot pueda realizar la soldadura de cada elemento. El robot se desplaza por la célula de un puesto a otro gracias a un eje lineal sobre el que está montado. Además, el eje lineal coloca al robot frente al elemento que se necesite soldar en cada momento. Este eje tiene un recorrido de 6 m, lo que permite al robot realizar la soldadura de depósitos de hasta 2 m de altura. El eje lineal sobre el que va montado el robot se programa de la misma forma que el posicionador, como un eje externo. Finalmente la célula cuenta con barreras fotoeléctricas que permiten detectar el paso del robot del puesto 1 al 2 (elementos 12 y 13 en la Fig. 2) y la presencia de personal en cada puesto (elementos 10 y 11, Fig. 2) de forma que se evite la presencia simultánea de personal y robot en el mismo puesto de soldeo.

2.2. SISTEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN

Los depósitos a presión disponen de conexiones en el cuerpo de la virola para poder realizar las funciones de llenado, vaciado, inspección y medición [21]. En los depósitos de acero, estos elementos son de dos tipos: racores y bridas, y se encuentran soldados a lo largo de generatrices de la virola, en localizaciones concretas que permiten su posterior conexión con diversos componentes (tuberías, controladores de tempe-

1	Puesto1 – Eje externo (mesa giratoria).
2	Puesto 2 – Eje externo (mesa giratoria).
3	Eje lineal de traslación.
4	Limpiador de tobera – corta hilo.
5	Paneles perimetrales – verja.
6	Puerta de acceso – mantenimiento.
7,8	Pulsadores de parada de emergencia. Indicadores luminosos.
9	Consola de control.
10,11	Barreras fotoeléctricas.
12,13	Barreras fotoeléctricas.
14	Posición de seguridad del robot.
15	Máquina de soldadura.

Tabla 1: Componentes de la célula

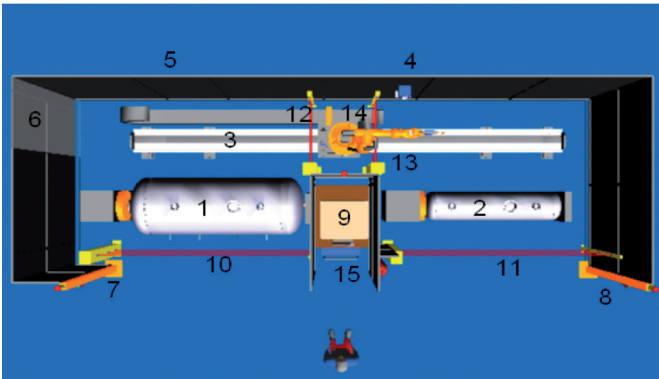


Fig. 2: Componentes de la célula

ratura, etc.), dependiendo de la finalidad del modelo (depósitos de inercia, acumuladores, calentadores, etc.).

El problema de definir el depósito se basa en localizar los elementos a soldar en la virola. Una vez localizados en ella, se deben proporcionar los datos de los radios de los elementos a soldar y de la virola para poder calcular la trayectoria a seguir por el robot. Esas trayectorias de soldadura serán las curvas de intersección de dos formas geométricas cilíndricas con sus ejes intersectados, en el caso de racores, y una circunferencia en el caso de bridas con embutición. De este modo, es posible desarrollar los algoritmos necesarios para calcular los puntos de soldadura y las orientaciones de la antorcha (herramienta del robot), a partir de la definición de la posición de los elementos a soldar y su tipo (racor o brida). Para ello, se elige una posición de referencia inicial de la virola y se define la distancia a lo largo de esa posición donde se deben localizar los elementos para poder realizar la unión soldada. Esta información se almacena de forma estructurada en un fichero con formato XML, ya que es un formato de tipo estructurado y versátil [22,23]. A partir de esta información se deben calcular los movimientos del robot utilizando coordenadas articulares o coordenadas cartesianas. Con el método seleccionado se calculan las coordenadas articulares, ya que de esta forma únicamente son necesarios seis parámetros articulares para definir

la posición del robot. Si se utilizasen coordenadas cartesianas sería necesario definir dos parámetros más.

El siguiente paso consiste en traspasar la información calculada (puntos de soldadura, coordenadas articulares, número de puestos...) al programa de simulación del robot para comprobar que la simulación es correcta, y realizar los ajustes necesarios minimizando de este modo el tiempo de preparación en la célula. Una vez comprobada la simulación se obtiene el programa en el lenguaje del robot (KRL - *KUKA Robot Language*).

Las etapas utilizadas en la metodología desarrollada son las siguientes:

- Generación del fichero XML. Fichero con los parámetros de definición del depósito y del proceso de soldadura.
- Desarrollo de algoritmos para la programación del robot.
 - Cálculo de las posiciones y orientaciones de soldadura.
 - Generación de ficheros para ejecución en MATLAB.
 - Cálculo de las coordenadas articulares del robot mediante cinemática inversa.
 - Introducción de coordenadas articulares.
 - Generación del fichero de simulación.
- Simulación del proceso de soldadura. En esta etapa se comprobará la validez de los cálculos realizados en el entorno de simulación KUKA SIMPro.
- Exportación del fichero de simulación al lenguaje de programación del robot KRL.
- Edición del programa del robot.
- Ejecución del programa del robot.

Como se ha mencionado previamente, la información de los parámetros del depósito y del proceso de soldadura se almacena en un archivo con formato XML, ya que es un tipo de archivo que permite estructurar datos, es estándar, independiente de la plataforma utilizada y utiliza etiquetas y atributos. Este fichero se puede obtener con cualquier editor de texto plano que soporte el manejo de estándar XML como Notepad Plus, Bloc de notas, Scite, etc.

En este fichero se definen los datos geométricos que describirán los elementos del depósito a soldar (tipo de conexión, distancia del elemento al origen, número de puesto, diámetros, altura libre) y algunos parámetros del proceso de soldeo (longitud del arco, extremo libre del hilo, ángulo de la antorcha de soldadura). El parámetro “altura libre” es la distancia de seguridad alrededor del depósito en la que no deben existir obstáculos. De esta forma, se asegura que la herramienta no colisiona con el depósito durante el proceso de soldadura. Además, define la distancia a la que debe situarse la herramienta una vez finalizado el proceso de soldadura para realizar el desenrollado de los cables de la manguera. La programación de estos parámetros se ha realizado de forma paramétrica, de manera que la modificación del programa para fabricar otro modelo de depósito es muy sencilla y rápida.

2.3. DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL ROBOT

En este apartado se recogen los algoritmos utilizados para obtener las posiciones del robot en función de la geometría de los elementos del depósito. Estos algoritmos se han desarrollado en tres etapas: cálculo de los puntos de las trayectorias de soldadura, cálculo de las orientaciones de la antorcha

y cálculo del número de puntos de las trayectorias. Como se tienen dos tipos de elementos a soldar en el depósito: racores y bridas, para cada uno de ellos el cálculo de sus puntos de soldadura será distinto.

2.3.1. Cálculo de los puntos de las trayectorias de soldadura

Para calcular los puntos de las trayectorias de soldadura se van a distinguir dos casos: 1. Soldadura del racor a la virola; 2. Soldadura de la brida al cuello de la virola.

1. Soldadura del racor a la virola

Para el elemento tipo racor, los puntos de la trayectoria que debe seguir el robot en la soldadura serán los puntos de la curva intersección entre dos superficies cilíndricas de distinto radio, cuyos ejes de revolución se cortan formando un ángulo de 90°. Esta soldadura unirá el racor con la virola.

El primer paso es definir el sistema de referencia a utilizar y los parámetros que definen los elementos a unir. El origen del sistema de referencia se sitúa en el inicio de la generatriz que contiene el racor a soldar (Fig. 3a). Los parámetros que describen los dos cilindros son: radio de la virola (R_0), radio del racor (R_1) y la distancia desde el inicio de la generatriz al centro del racor (X_1) (Fig. 3b).

$$\begin{cases} R_0 \cdot \cos(\theta) - R_0 = Z \\ R_0 \cdot \sin(\theta) = Y \end{cases} \quad \begin{matrix} \theta \in [0, 2\pi] \\ X \in [-\infty, +\infty] \end{matrix} \quad (1)$$

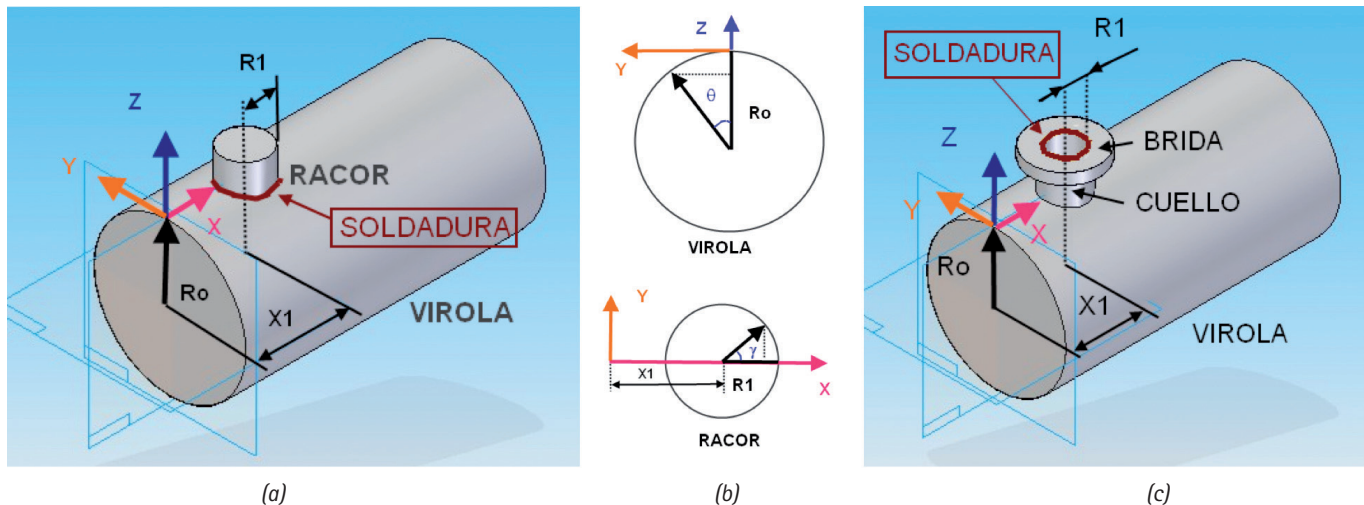
$$\begin{cases} R_1 \cdot \cos(\gamma) - X_1 = X \\ R_1 \cdot \sin(\gamma) = Y \end{cases} \quad \begin{matrix} \gamma \in [0, 2\pi] \\ Z \in [-\infty, +\infty] \end{matrix} \quad (2)$$

A partir de las ecuaciones paramétricas de la virola (Eq. 1) y del racor (Eq. 2), donde θ y γ están representados en la fig. 4, se obtienen los puntos de intersección aplicando la siguiente secuencia de operaciones: 1° se define un valor de γ , 2° se calcula X e Y del racor, 3° se calcula θ de la virola y, finalmente, 4° se calcula Z .

2. Soldadura de la brida al cuello de la virola

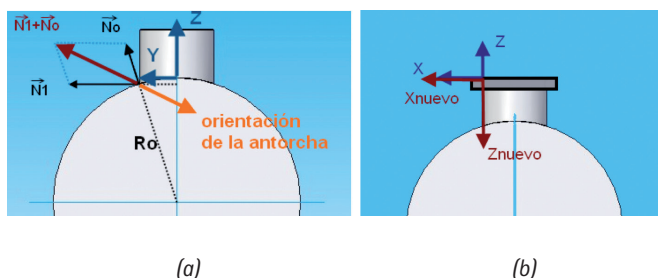
En el caso de la brida (Fig. 3c) los puntos de la trayectoria que debe seguir el robot en la soldadura serán los puntos de una circunferencia. Esta soldadura unirá la brida con el cuello (porción de la virola que ha sido embutida para sostener la brida). La ecuación paramétrica de la brida en el plano XY es la misma que la utilizada para el racor (Eq. 2). Esta ecuación, en el caso de la brida, define la circunferencia que debe trazar el robot. Es necesario notar que la cota Z depende de la altura del cuello embutido en la virola.

En primer lugar se elige el sistema de referencia a utilizar. Su origen coincidirá con el inicio de la generatriz que contiene la brida a soldar. A continuación se definen los parámetros que describen la circunferencia (R_0 : radio de la virola, R_1 : radio de la brida, X_1 : distancia desde el inicio de la generatriz al centro de la brida). Seguidamente se define la circunferencia en coordenadas paramétricas según los ejes seleccionados.



2.3.2. Cálculo de las orientaciones de la antorcha

La orientación que debe tener la antorcha varía en cada posición de la soldadura. Por ello es necesario definir la orientación correcta de la misma para cada punto. De la misma forma que en el cálculo de los puntos de soldadura, habrá que distinguir entre los casos de soldadura de racor y de brida. Para el caso del racor (Fig. 4a) se busca que la herramienta siga la orientación de la suma de las normales de los elementos a soldar en sentido inverso, ya que la antorcha debe soldar hacia el interior del depósito. Es decir, queremos que el nuevo eje Z sea la orientación de la antorcha deseada. Mientras que en el caso de la brida la orientación deseada para la herramienta es la del eje $-Z$ definido en el sistema de referencia (Fig. 4b).



2.3.3. Cálculo del número de puntos de las trayectorias

El robot se programa para que alcance los puntos programados siguiendo una trayectoria lineal, por lo que la diferen-

cia entre la trayectoria programada y la curva intersección viene definida por el número de puntos utilizados en la programación. En este apartado se muestra el cálculo del número de puntos necesarios para conseguir que la trayectoria lineal no se desvíe de la intersección del elemento y de la virola más de un valor $e_{m\acute{a}x}$ determinado (Fig. 5). Para simplificar los cálculos se tiene en cuenta el hecho de que $R_0 \gg R_1$, por lo que se aproxima la curva intersección a una circunferencia plana de radio R_1 .

En la Fig. 5, R_1 es el radio; $e = e_{m\acute{a}x}$ es la distancia entre la recta que une dos puntos y el arco de circunferencia que los une; x es la mitad de la distancia en línea recta entre P_1 y P_2 y α es el ángulo abarcado entre dos puntos consecutivos.

El valor de la diferencia máxima admisible entre la trayectoria programada y la curva de intersección será un dato de entrada. Para una distancia admisible, $e_{m\acute{a}x}$, se puede calcular el ángulo abarcado, α , entre dos puntos consecutivos para que la distancia máxima entre la interpolación lineal y la curva sea $e_{m\acute{a}x}$ (Eq. 4). Por lo que el número de puntos se obtiene directamente distribuyéndolos a partir de este ángulo.

$$\alpha = 2 \cdot \text{atg} \left(\frac{e_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2 \cdot R_1 \cdot e_{m\acute{a}x} - (e_{m\acute{a}x})^2}} \right) \quad (4)$$

Finalmente se genera un programa donde se almacena la siguiente información: número de elemento, tipo de elemento (racor, brida...), diámetro del elemento, posición, orientación y número de puntos.

2.3.4. Cálculo de las coordenadas articulares del robot

Una vez obtenidas las posiciones y orientaciones necesarias para realizar el proceso de soldadura se deben calcular las coordenadas articulares necesarias para conseguir que el robot ejecute las trayectorias deseadas.

En esta etapa se generan unos ficheros para su ejecución en Matlab. De esta forma, se programa un fichero para cada elemento donde se indica el número de puesto, posición y orientación de la herramienta en el punto y diámetro de la virola y del elemento.

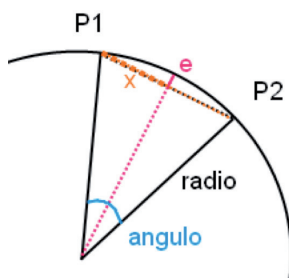


Fig. 5: Diferencia entre la aproximación lineal y la curva intersección

El paso siguiente es definir el robot (geometría, número de ejes, límites articulares). Para ello se ha utilizado la herramienta “Robotics ToolBox” de Matlab, ya que esta herramienta permite definir los ejes del robot según los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) [24] mostrados en la Tabla 2. La Fig. 6 muestra los sistemas de referencia utilizados para el modelado del robot.

Toda la información generada en Matlab (coordenadas articulares y valores de cada elemento) se integra en un nuevo fichero XML con el fin de tener toda la información en un único fichero. La simulación utilizando el software Kuka SimPro requiere la programación de puntos por aprendizaje. Sin embargo, la utilización de Matlab en un paso intermedio nos permite utilizar un algoritmo en el que a partir de los datos del racor y de la virola se genera directamente el programa para el robot, permitiendo la posterior simulación utilizando el software Kuka SimPro sin necesidad de introducir las coordenadas manualmente para la definición de los puntos, lo que conlleva un ahorro de tiempo.

Articulación	Theta	d	a	Alfa	Sigma *
1	-90°	d_1	0	-90°	1
2	0	d_2	0	90°	1
3	q_3+90°	675	260	-90°	0
4	q_4-90°	0	680	0	0
5	q_5	0	0	90°	0
6	q_6	-670	-35	-90°	0
7	q_7	0	0	90°	0
8	q_8	-115	0	180°	0
(*) Sigma: este parámetro sirve para indicar al Toolbox de Robótica de Matlab que es una articulación de traslación (1) o de rotación (0)					

Tabla 2: Parámetros de D-H para la modelización del robot

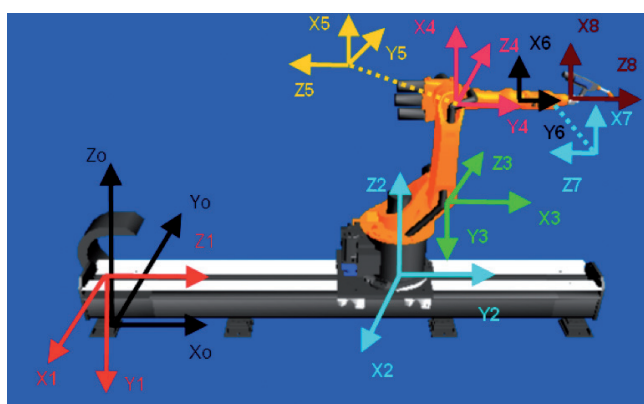


Fig. 6: Sistemas de referencia para la modelización de soldadura KR6 + dos ejes base del robot de soldadura

3. RESULTADOS

3.1. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA

En esta fase se realiza la adaptación de los resultados para poder generar un fichero de simulación que se ejecute en el

entorno KUKA SIMPro. Una vez programados los algoritmos necesarios para el control del robot, se ha realizado una simulación mediante el software KUKA SIM. Para ello se carga en el programa de simulación el diseño de la célula y el fichero resultado del sistema informático. El software permite simular por pantalla los movimientos que se encuentran definidos en el modelo. De este modo, se ha verificado el correcto funcionamiento del robot comprobando posibles colisiones como se muestra en la Fig. 7.

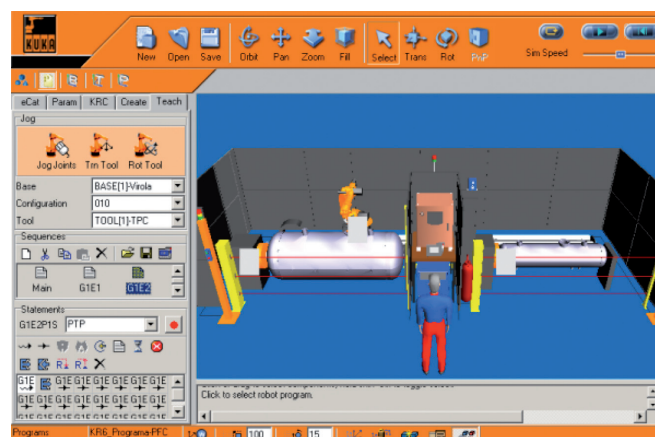


Fig. 7: Simulación de las trayectorias del robot

En esta etapa se han validado y comprobado los resultados obtenidos con el sistema informático. Se comprueba que no haya colisiones del robot con los elementos y se verifica visualmente que las distancias sean correctas. Las modificaciones que se introducen en caso necesario son ajustes de las posiciones obtenidas por el programa en los pasos previos. El entorno de simulación permite modificar las coordenadas y las orientaciones de la antorcha en cada uno de los puntos calculados.

La utilización de dos puestos de trabajo (Fig. 1b) permite disminuir considerablemente el tiempo total del proceso. La comparativa de tiempos se ha realizado aplicando los mismos tiempos de las fases a los dos procedimientos. Es decir, se considera que los dos procedimientos (el manual y el robotizado) tardan lo mismo en realizar las soldaduras de un depósito.

Como ejemplo se considera la soldadura de 4 depósitos de un mismo modelo para simular una fabricación por lotes (ver Fig. 8). Para ello se considera:

- T.P: Tiempo de preparación. Tiempo que tarda el operario en preparar el depósito para poder realizar las soldaduras. Las operaciones incluidas en esta fase son: colocación del depósito en el puesto, punteado de racores y bridas en sus posiciones y la colocación de protecciones en las roscas y otros elementos.
- T.S: Tiempo de soldadura. Tiempo necesario para efectuar las soldaduras.
- T.R: Tiempo de retirada. Tiempo que cuesta retirar las protecciones de los elementos y desalojar el depósito del puesto.

Dicho modelo tiene como valores de tiempo: T.P=3 min, T.S=4 min y T.R=2 min, para cada uno de los depósitos.

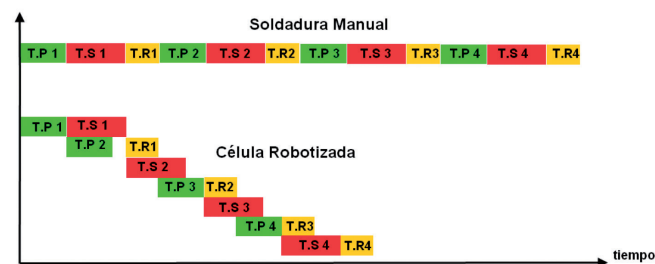


Fig. 8: Comparativa de tiempos para cuatro depósitos

3.2. PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA TRAYECTORIA DEL ROBOT

Se ha programado el robot para que ejecute las trayectorias de uno de los puestos de trabajo. Para ello, se ha implementado el fichero necesario que contiene los datos del depósito. La metodología presentada para la programación presenta un considerable ahorro de tiempo, dado que es suficiente generar un único fichero para obtener las trayectorias del robot en los diferentes puestos de trabajo una vez que se ha ejecutado el programa desarrollado. El ahorro de tiempo viene dado porque la metodología propuesta automatiza el proceso de programación, por lo que únicamente es necesario modificar las variables parametrizadas del fichero de configuración frente al desarrollo del programa completo del robot. De esta manera, el tiempo en la generación del programa en experiencias industriales similares se estima en diez horas aproximadamente. Mediante la metodología desarrollada, la modificación de las variables y todo el proceso necesario hasta la obtención del programa del robot se realiza en 30 minutos aproximadamente. Es necesario indicar que en ambas situaciones se requiere de un tiempo adicional de ajuste. Además, se debe considerar el ahorro de tiempo que se consigue al utilizar dos puestos de trabajo, como se ha explicado en el apartado 3.1.

Una vez validado el correcto funcionamiento del robot en el simulador, se debe exportar el fichero de simulación al lenguaje de programación del robot, en nuestro caso KRL (*Kuka Robot Language*), generando de este modo el programa del robot. La programación resultante se basa en llamadas a funciones donde cada una de ellas representará la soldadura de un elemento del depósito. En esta fase se podrá modificar el programa, especialmente las partes del programa que conciernen a los parámetros propios del lenguaje KRL (velocidades articulares, modo de ejecución en el robot,...), así como añadir o modificar funciones. Finalmente se ejecuta el programa del robot para que describa la trayectoria programada. La programación parametrizada del diseño de los elementos permite generar los programas del sistema de control del robot en menos de una hora frente a las más de diez horas que eran necesarias previamente. Esto se debe en gran medida a que la realización de los programas manualmente requiere que sea una persona cualificada la que defina las posiciones y las trayectorias del robot mientras que, siguiendo la metodología presentada, todas las tareas de programación están automatizadas a partir de la definición de la geometría y los parámetros principales del proceso de soldadura.

Los resultados obtenidos del programa informático se han verificado experimentalmente utilizando el robot (ver Fig. 9).

Se han seguido los pasos propuestos en la metodología, es decir, generación del fichero de datos, ejecución de los pasos del programa para obtener el programa del robot, simulación off-line de dicho programa y, finalmente, ejecución del programa en el robot. Como resultado destacar que una vez realizados los ajustes en simulación, no ha habido que realizar ningún ajuste en línea. Sin embargo, es necesario prever un tiempo necesario para el ajuste en planta en función de la complejidad de la célula. Las características de los elementos sobre los que se ha programado el ensayo son una virola de diámetro 110 mm, diámetro del racor 35 mm y la distancia desde el lateral de la virola hasta la posición del racor de 150 mm. Durante la ejecución se ha verificado visualmente que las distancias de trabajo eran las adecuadas y que no se han producido colisiones entre los distintos elementos.

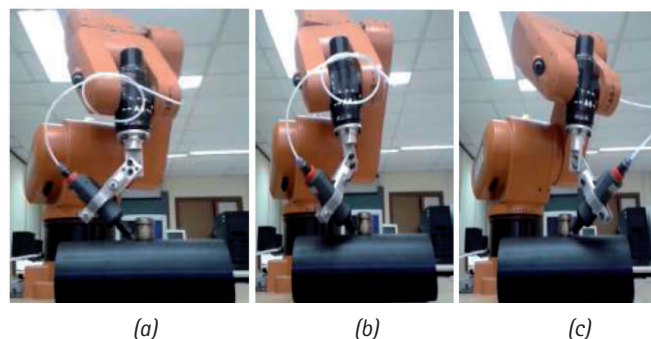


Fig. 9: Ejecución del programa del robot

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. DISCUSIÓN

La disminución de los tiempos de fabricación es siempre un aspecto importante en la industria de fabricación.

Por un lado, se debe considerar el tiempo de producción en taller. Por otro lado, el tiempo de programación sigue siendo un tiempo elevado, y la modificación del sistema de control no es una tarea sencilla de realizar, ya que requiere generar de nuevo los programas de control de los robots mediante la medición de los nuevos puntos de soldadura o la programación de los puntos mediante aprendizaje del robot para que posteriormente el robot pueda realizar la soldadura de forma automática.

Cuando se aborda la programación de una célula de soldadura y el tiempo necesario para llevarla a cabo, es necesario diferenciar entre el tiempo dedicado a la programación durante el que se necesita la célula y el tiempo de programación en el que no se requiere utilizar la célula (y ésta sigue disponible para continuar con la fabricación). Desde este punto de vista, los métodos de programación fuera de línea, como el presentado, significan una importante reducción de los tiempos de parada de la célula para la programación. Si, como en este caso, el método de programación incluye la simulación, el tiempo de parada se reduce al tiempo necesario para el ajuste final del programa una vez que el programa ya ha sido verificado en el simulador.

Además, el método desarrollado en este trabajo incorpora una ventaja adicional, ya que automatiza:

- La definición de las posiciones del robot y de los elementos auxiliares.

- La generación de los programas para la célula de trabajo y para su simulación a partir de la geometría del depósito.

De este modo, se disminuye el tiempo necesario para programar la célula y la dedicación a esta tarea del personal cualificado que se requiere para definir el proceso de soldadura.

En el presente trabajo se expone una metodología de programación para la generación automática de trayectorias. Esta metodología se ha integrado en una herramienta avanzada de programación. La herramienta consta de varios módulos cuyos datos de entrada son las características geométricas de los elementos a unir y la colocación del efector final respecto de la superficie de trabajo. A partir de estos datos se obtiene la programación de los movimientos de la célula de fabricación (robot y ejes auxiliares). Hay que tener en cuenta que en una etapa intermedia se simula el proceso para chequear colisiones y ajustar posiciones en caso de que sea necesario.

4.2. CONCLUSIONES

A partir del *layout* de una célula robotizada de soldadura, se ha desarrollado un método para sistematizar el proceso de obtención de los programas de forma que el robot de la célula realice la soldadura de los elementos conectados a la virola de los depósitos. La importación del fichero de datos generado con la información de los puntos y orientaciones para realizar la trayectoria de soldadura en el programa de simulación permite verificar la validez de los movimientos y realizar las correcciones necesarias antes de ejecutar la trayectoria deseada.

La programación para obtener nuevos modelos o modificar los ya existentes se realiza de una manera rápida y sencilla. El método presentado es una herramienta que permite reducir considerablemente el tiempo de programación del sistema a una décima parte del tiempo, si se compara con el tiempo necesario para programar la célula manualmente. En el caso de modificaciones mayores se requeriría un tiempo algo superior, dependiendo de la complejidad de la geometría, pero siempre inferior al que es necesario sin aplicar esta metodología. Además, en el propio proceso de fabricación se obtiene un ahorro de tiempo adicional, ya que la utilización de dos puestos de soldadura permite disminuir considerablemente el tiempo total del proceso.

Otra de las ventajas del método es que la programación y modificación de los modelos se realiza fuera de línea. De esta forma, la definición de parámetros y la simulación para la verificación de la trayectoria efectuada por el robot, se llevan a cabo sin detener la producción.

La flexibilización que ofrece la metodología desarrollada en cuanto a la programación de nuevos modelos de una manera rápida y sencilla, gracias a la parametrización de los distintos parámetros del proceso, la hace especialmente indicada a la práctica industrial, dado que cada vez más se requieren series cortas y modificaciones de los productos.

La sistematización del proceso de fabricación es generalizable a la soldadura de otros productos. Además, este tipo de metodología se podría aplicar en otros procesos de fabricación como, por ejemplo, mecanizado, procesos de pulido y, principalmente, en aquellos en los que se requiera que el robot siga una trayectoria controlada. En este caso, gracias al diseño modular de la herramienta de programación avanzada, únicamente sería necesario generar los programas correspondientes a la obtención de los puntos de las trayectorias.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pisu TM, Pisu EM, Bigioi O. "Researches regarding the welding of 15NiMn6 steel used for spherical tanks". *Metalurgia International*. 02/2009, ISSN: 1582-2214
- [2] Fester DA, Bingham PE. "Main tank injection (MTI) pressurization of liquid rocket propellant tanks". En: *54th International Astronautical Congress*, (Bremen, Germany 29 de septiembre a 3 de octubre de 2003), International Astronautical Federation 2003. P. 1-8 DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.IAC-03-IAA.2.3.06>
- [3] San Marchi C, Harris A, Yip M et al. "Pressure Cycling of Steel Pressure Vessels With Gaseous Hydrogen". En: *ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference*, (Toronto, Canada 15-19 de julio de 2012, American Society of Mechanical Engineers, 2012. P. 835-844. ISBN: 978-0-7918-5505-8 DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/PVP2012-78709>
- [4] Groot SP, Surki AA, de Vos RC et al. "Seed storage at elevated partial pressure of oxygen, a fast method for analysing seed ageing under dry conditions". *Annals of Botany*. 2012. Vol.110-6 p.1149-1159 DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcs198>
- [5] Megyesy EF. *Manual de Recipientes a Presión, Diseño y Cálculo*. México: Ediciones Limusa, Noriega Editores, 1998. ISBN: 9681819853
- [6] Niloufari A, Showkati H, Maali M et al. "Experimental investigation on the effect of geometric imperfections on the buckling and post-buckling behavior of steel tanks under hydrostatic pressure". *Thin-Walled Structures*. 2014. Vol.74 p.59-69 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.09.005>
- [7] Pérez-Turiel J, Fraile-Marín JC, Perán-González JR. "Aplicaciones de la robótica: últimas tendencias y nuevas perspectivas". *DYNA Ingeniería e Industria*. Abril 2002. Vol.77-3 p.61-68
- [8] Chen Y, Dong F. "Robot machining: recent development and future research issues". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol.66-9-12 p.1489-1497 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4433-4>
- [9] Iñigo RI, Ángulo JM. "Control de la trayectoria en manipuladores de robots industriales". *DYNA Ingeniería e Industria*. 1985. Vol.60-9 p.27-32
- [10] Pilat Z. "Different Solution of Robotic Cells for Metal Sheets Beveling". *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol.282 p.66-73
- [11] Landry C, Henrion R, Homberg D et al. Task assignment, sequencing and path-planning in robotic welding cells. *Methods and Models*. En: *IEEE 18th International Conference on Automation and Robotics*, 2013. P. 252
- [12] Barcellona A, Bruccoleri M, D'Onofrio C et al. "Improving of the Productivity and the Quality of a Manufacturing Robotized Cell for MIG/MAG Welding". En: *Proceedings of the 35th International MATADOR Conference*: Springer, 2007. P. 119
- [13] Chen S, Qiu T, Lin T et al. "Intelligent technologies for robotic welding". *Robotic Welding, Intelligence and Automation Springer*, 2004. P.123-143 DOI: 10.1007/978-3-540-44415-2_8
- [14] Pires JN, Godinho T, Ferreira P et al. "Industrial robotic system programmed from CAD files—an update". *Industrial Robot: An International Journal*. 2005. Vol.32-4 p.314-317 DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01439910510600164>
- [15] Pan Z, Polden J, Larkin N et al. "Recent progress on programming methods for industrial robots". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2012. Vol.28-2 p.87-94 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.08.004>
- [16] Xu Y, Yu H, Zhong J et al. "Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor". *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol.212-8 p.1654-1662 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.007>
- [17] Pachidis TP, Lygouras JN. "Vision-based path generation method for a robot-based arc welding system". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2007. Vol.48-3 p.307-331 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-006-9076-y>
- [18] Feddema JT, Mitchell OR. "Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation [for robots]". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*. 1989. Vol.5-5 p.691-700 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/70.88086>
- [19] Lima II EJ, Bracarense AQ. "Trajectory generation in robotic shielded metal arc welding during execution time". *Industrial Robot: An International Journal*. 2009. Vol.36-1 p.19-26 DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/01439910910924639>
- [20] Elatta A, Gen LP, Zhi FL et al. "An overview of robot calibration". *Information Technology Journal*. 2004. Vol.3-1 p.74-78
- [21] León Estrada JM. *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. México: Ediciones Alfa-Omega, 2001
- [22] Harold ER, Means W. *Xml: Imprescindible*. Madrid: Ediciones Anaya, 2005. ISBN: ISBN 9788441518124
- [23] Morrison M. *Diseño en HTML y XML*. España: Ediciones McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003. ISBN 9788448138226
- [24] Denavit J, Hartenberg RS. "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices". *Trans. ASME J. Appl. Mech.* 1955. Vol.22-1 p.215-221