

Implementación De Proceso De Pick And Place Mediante Grúa-Robot Aplicado A Celda De Manufactura Flexible

Implementation of a pick and place process using a robotic crane applied to a flexible manufacturing cell.

José Javier Doria García^{1*}, Fabián Leonardo Melo Cachay², John Jairo Chavez Chavez³

^{1,2,3}*Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

jjdoriag@unal.edu.co

flmeloc@unal.edu.co

jjchavezc@unal.edu.co

Resumen— La grúa-robot Maya es un prototipo de robot industrial cuyo objetivo es implementar un proceso de Pick and Place para la sujeción, transporte y posicionamiento de material dentro de una celda experimental de manufactura flexible.

El robot posee un sistema de sujeción versátil capaz de sujetar diversas geometrías. Su arquitectura es híbrida y cuenta con tres grados de libertad a los cuales se les implementó un control de posición mediante un controlador industrial y dos microcontroladores.

Con el desarrollo de esta máquina aumenta la flexibilidad de la celda, contribuyendo así a la automatización de los procesos de manufactura desarrollados en ella.

Palabras clave— Automatización, controlador, manipulador, Pick&Place, sistema de manufactura flexible.

Abstract— The Maya robot is an industrial robot prototype which objective is to implement a Pick and Place process for handling, transporting and positioning of material within a flexible manufacturing cell.

The robot has a versatile handling system capable to handle diverse geometries. Its architecture is hybrid and it counts with three degrees of freedom in which a position control were implemented by using an industrial controller and two microcontrollers.

With the development of this machine the flexibility of the cell is improved, contributing with the automation of the manufacturing processes developed on it.

Key Word — Automation, controller, flexible manufacturing systems, gripper Pick&Place.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de manufactura flexible (FMS, por sus siglas en inglés) son sistemas automatizados que brindan una producción y variedad de productos mediana, con alto grado de calidad final. De la misma manera, permiten flexibilidad productiva y gestión en tiempo real, con lo que se obtiene un alto nivel de automatización de los procesos. En los últimos años los FMS han demostrado ser una alternativa a los sistemas de manufactura tradicionales, entre sus beneficios se encuentran la reducción de costos, un uso más eficiente de las máquinas que lo componen, control por computador, etc. En Colombia la pequeña y mediana industria que se desempeña en el sector de manufactura aún trabaja con un enfoque de alta producción y baja variedad, es decir, es un sistema con baja flexibilidad.

Con el desarrollo del robot Maya se plantea una ampliación en la flexibilidad de los procesos de las pequeñas y medianas industrias debido a que, al aumentar el grado de automatización, los tiempos de transporte entre máquinas se verán reducidos y el control resultará más sencillo de implementar y manejar.

Teniendo en cuenta que uno de los componentes fundamentales de una celda de manufactura flexible es el sistema de transporte y posicionamiento de pieza, para el cual se utilizan comúnmente robots seriales, robots gantry, conveyors o Automatic Guided Vehicles (AGV's), el presente proyecto se enfoca en desarrollar e implementar un sistema de posicionamiento eficiente para el manipulador de la grúa Maya, ubicada en el Laboratorio de Automatización de la Universidad Nacional de Colombia.

II. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT

La grúa Maya es un robot industrial de arquitectura híbrida, es decir, combina la arquitectura serial con la arquitectura paralela. La parte serial está compuesta por una cercha de tres metros de largo que rota sobre un eje vertical hasta un límite de 90° con lo que se forma un cuarto de círculo en un plano horizontal. La parte paralela está formada por dos correas dentadas, dos motores, dos poleas dentadas y su respectivo sistema de compensación de tensión para las correas. Al final de cada correa se conecta el manipulador que se encargará de sujetar las piezas a ser transportadas en la celda de manufactura del Laboratorio de Automatización de la Universidad Nacional. El mecanismo de movimiento por correas crea un plano vertical, que unido a la rotación antes descrita definen el espacio de trabajo del robot. En la figura 1 se observa una fotografía de la grúa y en la figura 2 se puede ver el espacio de trabajo del robot Maya.



Fig. 1. Fotografía del robot Maya.

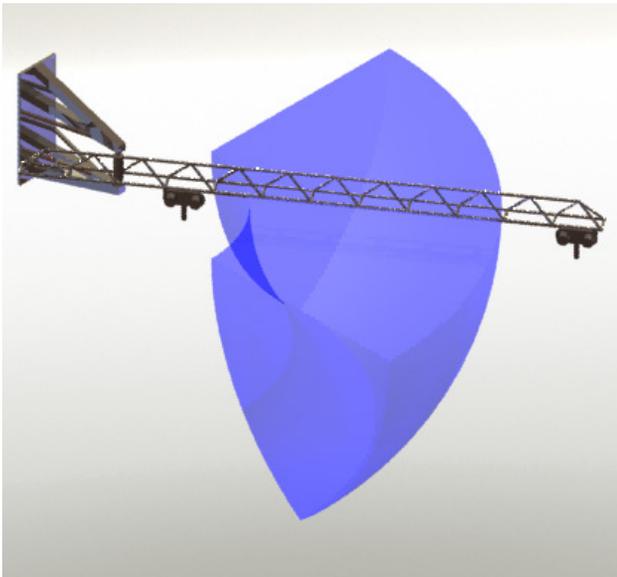


Fig. 2. Espacio de trabajo del robot Maya.

Para el desarrollo de la grúa se decidió no utilizar los sistemas convencionales de posicionamiento del efector final sino el

sistema de arquitectura paralela explicado anteriormente. Este tipo de sistemas tienen ciertas ventajas con respecto a los sistemas seriales tradicionales. Los robots basados en cables son compactos y de construcción y mantenimiento más económico, son livianos y fácilmente ensamblables y reconfigurables [1]. Además tienen un rango de movimiento amplio y pueden ser utilizados en múltiples aplicaciones.

El sistema motriz de la grúa está compuesto por tres motores DC que le proporcionan tres grados de libertad al robot, con los que se generan los movimientos del manipulador dentro del espacio de trabajo.

La restricción de movimiento de la pluma se implementó por medio de sensores de final de carrera situados en la posición de cero de máquina y la posición final, que es cuando la pluma se encuentra a 90° .

III. CONTROL DE POSICIÓN DEL ROBOT

El control de los motores se realiza por medio de un controlador industrial Legend 04 de Yaskawa y dos microcontroladores PIC 16F877A conectados como esclavos a este. Al ser el Legend 04 un controlador para un solo eje, este se utiliza para controlar el motor del eje principal de la grúa, es decir, el motor de la pluma.

Al intentar utilizar las conexiones de entradas y salidas (I/O) sobrantes del controlador Yaskawa para controlar los motores del robot paralelo se encontraron restricciones tales como corriente por debajo de lo necesario para alimentar a los motores o conexiones de I/O insuficientes. Por las anteriores razones se decidió utilizar dos microcontroladores para realizar el control de los motores restantes, uno para controlar cada motor.

Para suministrar la corriente que los motores demandan y controlar el sentido de giro de los motores, se implementó una etapa de potencia con dos puentes H.

Los microcontroladores establecen comunicación con el controlador Legend 04, reciben una señal de referencia y envían de vuelta al controlador una señal de que ya se llegó a dicha referencia. Además, cada PIC envía señales a cada puente H y este a su vez envía señales de conmutación de sentido de giro, de PWM y de enable para controlar los movimientos de cada motor.

La utilización de un driver se justifica también con la necesidad de independencia de las señales de control y las señales de potencia. Generalmente el microcontrolador maneja salidas digitales que manejan baja potencia en relación con el requerimiento del motor, para esto se hizo un acople óptico entre el driver y el controlador con el fin de proteger el controlador de sobrepicos de energía generados en el driver por condiciones de funcionamiento del motor.

El esquemático del circuito usado para cada motor es el siguiente:

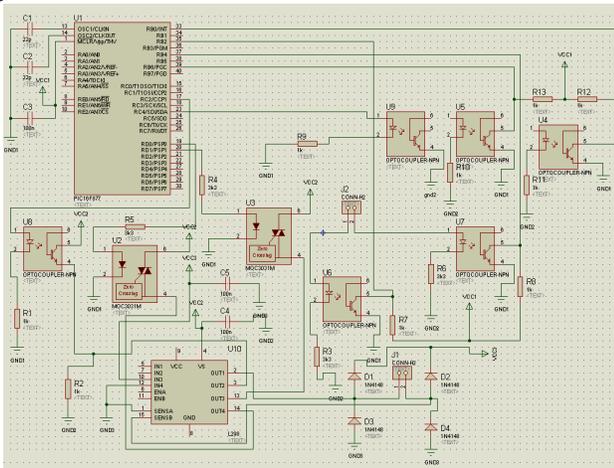


Fig. 3. Esquemático del circuito para controlar un motor.

Para saber en qué posición se encuentra cada motor se utilizan encoders incrementales de 1024 pulsos por revolución los cuales envían señales al microcontrolador informando la posición de cada motor en cada instante de tiempo.

El diagrama de bloques para el control de posición de la grúa se observa en la figura 4. En esta se puede observar que los bloques de driver, planta y sensor integran un bloque más grande y general denominado planta ampliada. Esta proceso se hace debido a que los motores con los que cuenta el robot paralelo no tiene hoja de datos y por lo tanto no fue posible encontrar los parámetros necesarios para hallar su función de transferencia, por consiguiente es necesario hacer pruebas experimentales con el fin de encontrar esta función. Las pruebas se realizan habiendo acoplado el driver y el sensor al motor que se desea caracterizar.

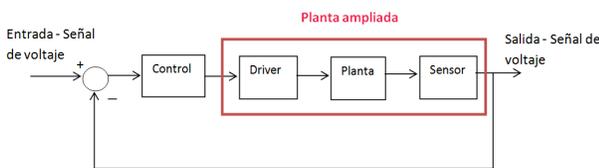


Fig. 4. Diagrama de bloques para el control de posición.

IV. ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA INVERSA

El análisis cinemática de la grúa se divide en dos partes: primero se analiza el plano de movimiento proporcionado por el robot de arquitectura paralela, seguido del uso de la descripción Denavit-Hartenberg al conjunto completo, es decir, de la arquitectura serial.

El mecanismo de movimiento por correas, es un caso de una máquina de arquitectura paralela, una solución aproximada y

razonable al problema consiste en describir la posición del actuador respecto a un sistema de referencia definido en función de las longitudes instantáneas de las correas y la distancia entre centros de las poleas, para esto es necesario hacer una descripción geométrica, la figura 5 presenta algunas de los parámetros definidos.

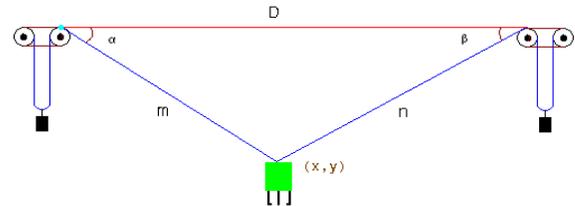


Fig. 5. Descripción geométrica del robot paralelo.

Se tienen las siguientes expresiones:

$$L_1 = m + m_e \quad (1)$$

$$L_2 = n + n_e \quad (2)$$

$$m_e = r_1 \theta_1 \quad (3)$$

$$n_e = r_2 \theta_2 \quad (4)$$

Donde:

L_1 = longitud de la correa 1.

L_2 = longitud de la correa 2.

m = porción libre de la correa 1.

m_e = porción de la correa 1 enrollada en la polea 1.

n = porción libre de la correa 2.

n_e = porción de la correa 2 enrollada en la polea 2.

r_1, r_2 radios de las poleas.

θ_1, θ_2 ángulos de rotación de cada polea.

Las longitudes libres de las correas están dadas por:

$$m^2 = x^2 + y^2 \quad (5)$$

$$n^2 = (D - x)^2 + y^2 \quad (6)$$

Los ángulos de rotación de las poleas, en términos de las porciones libres de correa, la distancia entre centros de polea y las coordenadas de posición del efector final respecto al sistema de referencia, son:

$$\theta_1 = \frac{1}{r_1} (L_1 - \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (7)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{r_2} (L_2 - \sqrt{(D - x)^2 + y^2}) \quad (8)$$

Las expresiones 7 y 8 son las que permiten determinar cuánto deben rotar los motores para posicionar el efector final en las coordenadas (x,y) respecto al sistema de referencia (punto de color cian en la figura 5).

En la parte del análisis de la arquitectura serial, se trata a la grúa como si fuera un sistema de eslabonamientos serial con

articulaciones rotativas, se hace una descripción Denavit-Hartenberg, es decir, se definen tramas en cada articulación, se determinan las variables y constantes de articulación y se obtienen matrices de transformación entre tramas. El objetivo de este análisis es encontrar expresiones analíticas que permitan realizar un mapeo de coordenadas de posición del efector, respecto a un sistema global de referencia a coordenadas descritas respecto al sistema local de referencia del robot paralelo. Las expresiones aquí obtenidas junto con las expresiones del apartado anterior (arquitectura paralela), permitirán saber cuánto deben rotar los ejes de los motores de la pluma y muisca para posicionar el efector en el lugar deseado. La figura 6 muestra una posible asignación de tramas. La trama A (roja) representa el sistema de referencia global respecto al cual se especifica la posición del actuador, la trama B (verde) se asigna sobre el eje de rotación de la pluma (articulación de rotación), la trama C (azul) representa la trama local de referencia para el robot paralelo.

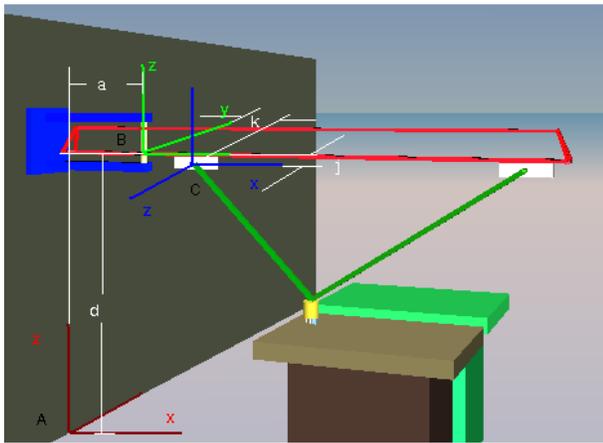


Fig. 6. Asignación de tramas de Denavit-Hartenberg para la grúa.

La tabla con los parámetros de articulación para las tramas definidas son los siguientes:

Articulación	θ_i	d_i	α_{i-1}	a_{i-1}
1	θ_1	d	0	a
2	0	j	90	k

Tabla I. Parámetros de Denavit-Hartenberg.

Las matrices de transformación para cada trama son:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c_{i-1} & c_i c_{i-1} & -s_{i-1} & -s_{i-1} d_i \\ s_i s_{i-1} & c_i s_{i-1} & c_{i-1} & c_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & k \\ 0 & 0 & -1 & -j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para un punto 0P descrito en la trama global, el mapeo a coordenadas descritas en el sistema local de referencia 2P , esta dado por:

$${}^2P = ({}^0T_1 {}^1T_2)^{-1} {}^0P$$

Con ${}^2P = [x \ y]$ y las ecuaciones 7 y 8 es posible determinar los movimientos angulares requeridos para los ejes de los motores del muisca.

Con ${}^0P = [X \ Y \ Z]$ es posible determinar el movimiento angular del eje del motor de la pluma:

$$\theta_3 = \text{atan2}(Y, X)$$

V. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EFECTOR FINAL

Debido a la flexibilidad de pieza requerida por la celda experimental de manufactura, el efector final del robot Grúa MAYA tendrá como propósito la sujeción de múltiples geometrías de pieza y también diferentes tamaños de pieza.

El proceso de diseño del efector final ha involucrado un análisis de las soluciones en el mercado, un análisis QFD y un análisis funcional, de la generación de conceptos de diseño el concepto que representa la mejor solución se ilustra a continuación.

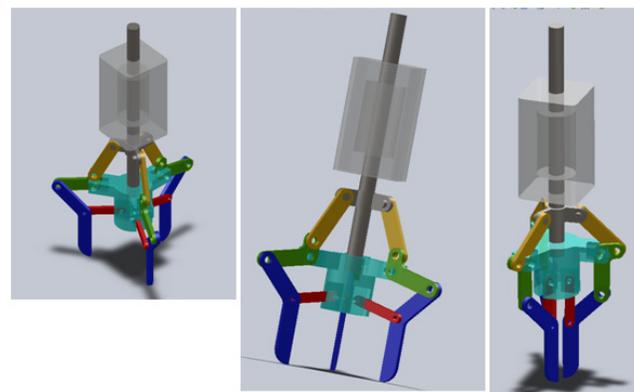


Fig. 7. Modelo CAD del gripper.

Este efector final cuenta con tres mordazas, el movimiento se genera mediante un actuador neumático, este está conectado a un mecanismo de arquitectura paralela que permite cambiar la

orientación del movimiento y cierra o abre las mordazas de forma paralela.

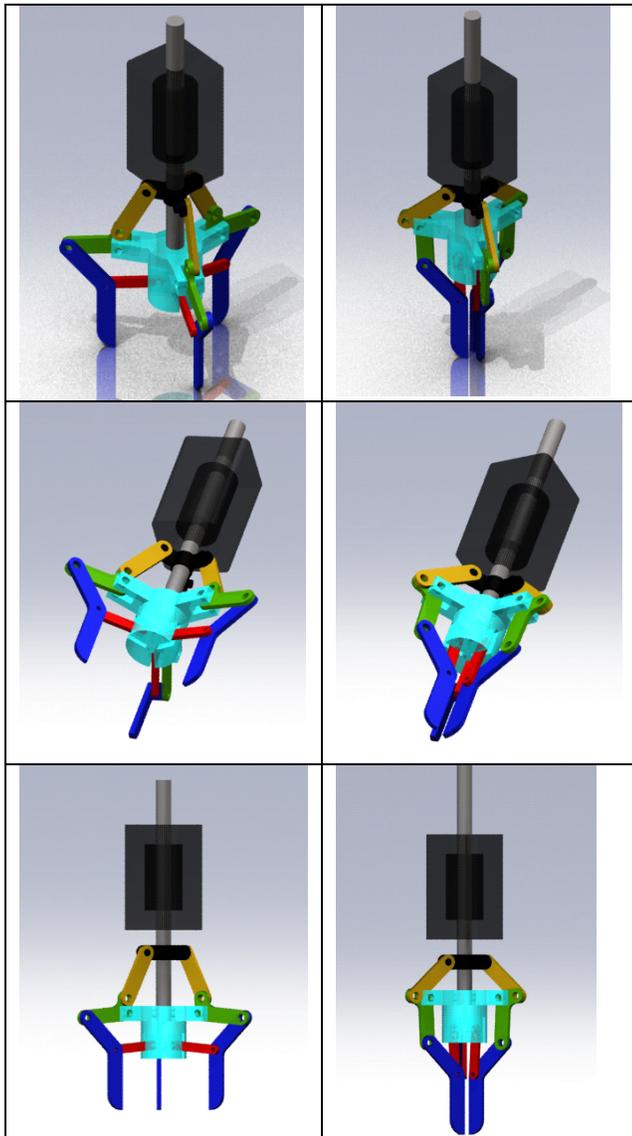


Fig. 8. Modo de apertura y cierre.

¿Por qué este y no los de cierre angular? Con un cierre de pinzas paralelas se logra una mayor versatilidad, las pinzas angulares son débiles frente a múltiples geometrías, a continuación se ilustran dos casos puntuales en los que la solución de pinzas paralelas presentan una ventaja superior.

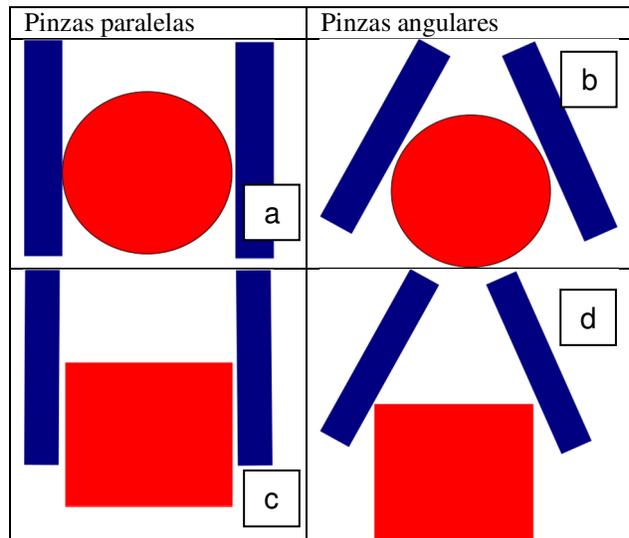


Fig. 9. Cierre paralelo vs. Cierre angular.

VI. PROCESO DE PICK AND PLACE

La celda experimental de manufactura del Laboratorio de Automatización de la Universidad Nacional de Colombia está conformada por dos máquinas CNC, que son el centro de mecanizado Leadwell V-20 y la máquina multiejes, además de una máquina digitalizadora (CMM) y un robot SCARA. Las máquinas y su distribución en el laboratorio se pueden ver en la figura 10.



Fig. 10. Distribución de máquina de la celda de manufactura.

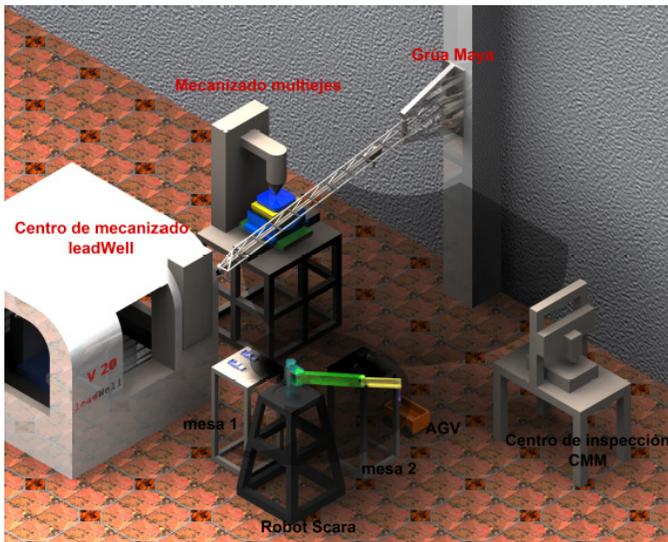


Fig. 11. Celda experimental de manufactura – Laboratorio de Automatización, Universidad Nacional de Colombia.

Como ya se explicó, el objetivo del robot Maya es la sujeción y el transporte de piezas entre las máquinas que componen la celda. A continuación se describirá una secuencia de transporte de la grúa dentro de la celda de manufactura flexible. Primero el manipulador de la grúa sujeta la pieza mecanizada en el centro de mecanizado Leadwell V-20 para luego trasladarla la máquina multiejes con el fin de culminar su manufactura. Una vez terminado este proceso la grúa sujeta el material maquinado en la máquina multiejes para transportarlo a la máquina digitalizadora con el propósito de realizar un control de calidad de la pieza. Finalmente, si la pieza tiene una buena calidad superficial, esta se sujeta en la CMM y es transportada al robot SCARA para su ensamblaje [2]. A continuación, en las figuras 11 y 12 se ilustran los procesos de transporte entre las máquinas que fueron descritos anteriormente.

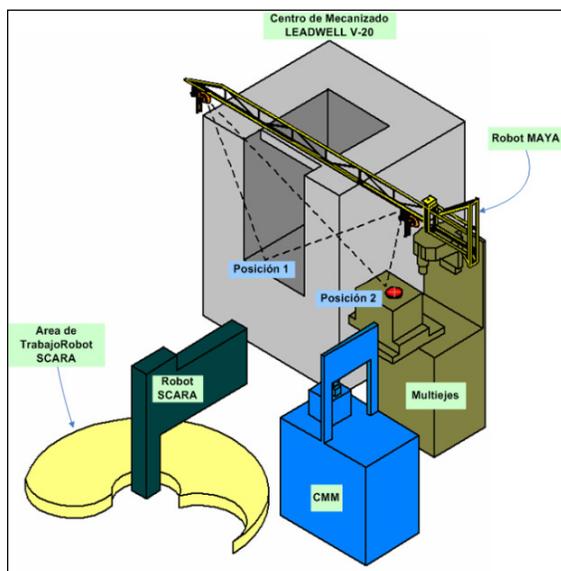


Fig. 12. Proceso de transporte 1.

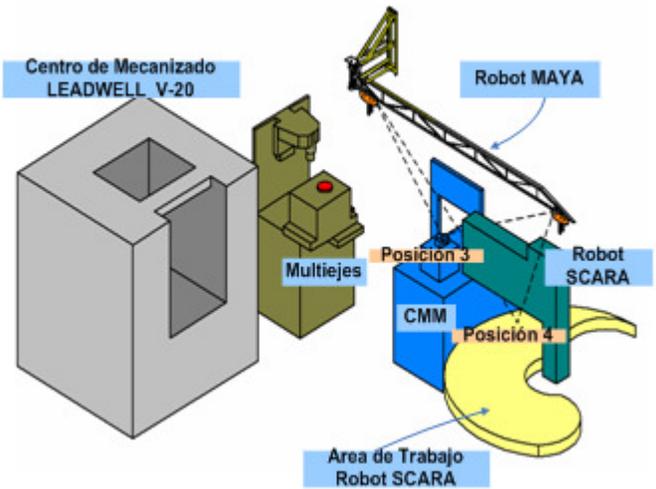


Fig. 13. Proceso de transporte 2.

VII. CONCLUSIONES

El robot Maya, al ser un prototipo de robot económico y de relativa fácil fabricación, es una herramienta de gran utilidad para el transporte de piezas dentro de celdas de manufactura, lo cual conlleva a un aumento en la flexibilidad de los procesos y del mismo modo una mejora en la automatización industrial de las empresas de manufactura del país. Así mismo, las velocidades de carga, transporte, posicionamiento y descarga se verán drásticamente disminuidas, trayendo consigo una disminución de tiempos en los procesos y estos a su vez una reducción de costos.

Los robots paralelos por cables resultan ser una solución que trae grandes ventajas a la hora de implementarse, debido a su bajo precio de adquisición y mantenimiento, fácil ensamblaje, reconfiguración y amplio espacio de trabajo.

RECOMENDACIONES

Para obtener un control más preciso del manipulador es recomendable utilizar controladores industriales con el fin de tener un control más eficiente de los motores, así como también usar una etapa de potencia más robusta que pueda suministrar de manera efectiva la corriente demandada por los motores del robot paralelo, con lo cual se facilita su implementación y posterior reconfiguración.

Agradecimiento especial al Ingeniero Ernesto Córdoba Nieto por brindarnos la oportunidad de trabajar en este proyecto y por su constante apoyo durante su desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] P. Bosscher, A. T. Riechel, and I. Ebert-Uphoff, "Wrench-Feasible workspace generation for cable-driven robots," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 22, Oct. 2006.
- [2] L. L. Howell, "*Compliant mechanisms*". New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [3] A. Perpiñan, D. H. Amaya, J. A. Nontoa and H. J. Gamboa, "Sistema Automatizado De Transporte E Identificación De Materiales Con RFID Y Visión De Máquina," *2011, IV Seminario de investigación interdisciplinaria.*, pp. 72-84.
- [4] R. Bostelman, J. Albus, N. Dagalakis and A. Jacoff, "RoboCrane Project: An advanced Concept for Large Scale Manufacturing," National Institute of Standart anf Technology, Gaithersburg, Maryland .