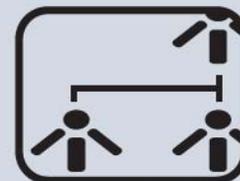


DISEÑO MECATRÓNICO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN PARA UN MANIPULADOR PUMA



AUTOR

Omar Lengerke Pérez
 Doctorando en Ciencias en Ing. Mecánica
 Grupo de sistemas Mecatrónicos y Robótica
 (UNAB)
 Universidad Federal de Rio de Janeiro (UFRJ)
 Olengerke@ufrj.br
 BRASIL

AUTOR

Max Suell Dutra
 Doctor en Ingeniería Mecánica
 Profesor Adjunto IV - COPPE - UFRJ
 Universidad Federal de Rio de Janeiro
 Max@mecanica.coppe.ufr.br
 BRASIL

AUTOR

Juan Carlos Diaz
 Ingeniero de Sistemas
 Coordinador Programa Diseño y Admón.
 Sistemas
 Unidades Tecnológicas de Santander
 jcdiaz@utsvirtual.net
 COLOMBIA

Fecha de Recepción del Artículo: Abril 12 de 2007
Artículo Tipo 1

Fecha de Aceptación del Artículo: Julio 3 de 2007

RESUMEN.

Este artículo describe el diseño e implementación de un sistema de control de posición para un manipulador tipo PUMA (Brazo Manipulador Universal Programable) usando un controlador lógico programable (CLP) y simulado mediante un sistema de control supervisorio (SCADA). La caracterización de cada una de las articulaciones del manipulador es realizada en este documento, seguida de la implementación de una estrategia de control para la realización de sus movimientos. Las interfaces encargadas de la comunicación entre el CLP y el manipulador son expuestas, así como la programación implementada. Por último, hace parte de este artículo, el diseño de un sistema de simulación para el cálculo cinemático directo e inverso del manipulador.

PALABRAS CLAVE

Robótica
 Sistemas Mecatrónicos
 Manipulador PUMA
 Sistemas de Control de Posición

ABSTRACT

This article describes the design and implementation of a position control system for a manipulator type PUMA (Programmable Universal Manipulation Arm) using a Programmable logic controller (PLC) and simulated through a Control Supervisory System (SCADA). The characterization of

each one of the manipulator's articulations is realized in this document, followed by the implementation of a control strategy that allows to realize its movements. The interfaces responsible of the communication between PLC and the manipulator are exposed, as well as the implemented programming. Lastly, makes part of this article, the design of a simulation system for the direct and inverse kinematics calculation of the manipulator.

KEYWORDS

Robotics
 Mechatronics Systems
 PUMA Manipulator
 Position Control Systems

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el éxito de las empresas se ve reflejado por el alto grado de automatización con el que desarrollan sus procesos. Los lineamientos tecnológicos que son la base primordial para ofrecer productos de mejor calidad, a un menor costo y en un menor tiempo; son factores importantes en la competencia con otras industrias (economía global). Ante estos lineamientos, la robótica industrial desde sus orígenes estuvo orientada a las funciones de percepción y de acción en la manipulación de materiales en sistemas de manufactura, llegando a ser una tecnología fundamental, compuesta por sistemas electrónicos, mecánicos, de control y de computación, dando origen a conceptos de diseños de integración sinérgica: mecatrónica. La mecatrónica, busca obtener en el producto características como flexibilidad e inteligencia, diseñando sistemas mecánicos más simples, con costos reducidos y con facilidad para introducir modificaciones [1].

La evolución de la robótica en nuestro país ha sido muy lenta comparado con el desarrollo logrado por países como: Japón, Estados Unidos y algunos pertenecientes a la comunidad europea. Uno de los factores se debe a que las creaciones que logran algunos avances no contemplan un estudio detallado, y muy pocos registran información como guía para quienes desean continuar con el desarrollo o mejoramiento de estos diseños. La fabricación y desarrollo de este tipo de máquinas, genera un gran impacto tecnológico que impulsa al desarrollo de nuevas tecnologías y un avance en el conocimiento y estudio de los mismos.

Diversos son los tipos de manipuladores usados en las empresas que poseen ventajas en el desempeño de tareas repetitivas (pintura, ensamble, soldadura). El robot manipulador tipo PUMA (del inglés, Programmable Universal Manipulation Arm) es un sistema mecánico compuesto por cinco articulaciones activadas mediante motoredutores y servo motores que realizan la transmisión del movimiento por medio de engranajes, correas dentadas, acoples, ejes y rodamientos, complementados con un conjunto de sensores que tienen como función determinar la posición y orientación del manipulador, con el fin de obtener exactitud en sus movimientos y realizar un apropiado control sobre las articulaciones.

El presente artículo, contiene el diseño e implementación de un sistema de control de posición para un manipulador tipo PUMA, partiendo de los cálculos cinemáticos necesarios para el desarrollo del sistema de control de posición y la descripción de los motores y el sistema de transmisión que dispone cada articulación. De igual forma, son mostrados los dispositivos electrónicos implementados para el control del manipulador, el controlador, los programas implementados y el correspondiente diseño de la acción de control para el movimiento de las articulaciones. El sistema obtenido, es implementado en un prototipo de manipulador tipo PUMA llamado VERMA (Figura 1). Por último, es diseñada una herramienta de simulación encargada de los cálculos cinemáticos y el respectivo monitoreo del accionamiento y posición del manipulador.

Figura 1. Prototipo manipulador PUMA - VERMA.

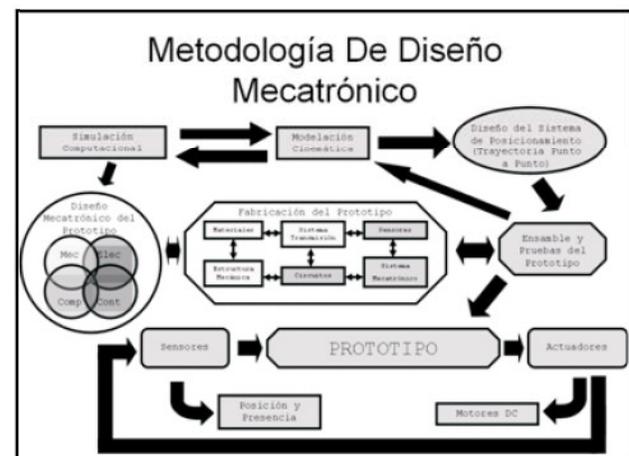


1. DISEÑO MECATRÓNICO

El desarrollo de una metodología para el diseño y construcción de un manipulador, involucra diferentes etapas que inician con una evaluación de las fuentes de información e identificación de las características del diseño de cada uno de los elementos que lo conforman (Figura 2), la exploración de las variables que intervienen en el proceso, y definición de las variables físicas que afectan al funcionamiento mecánico del manipulador, con el fin de evaluar sus posibles incidencias en su funcionamiento normal. El desarrollo de un modelo aproximado de la estructura mecánica del manipulador, es tratado mediante la conceptualización de una metodología mecatrónica que integra concurrentemente conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería, involucrando el uso de herramientas de diseño CAD (Diseño Asistido por Computador) y herramientas computacionales dedicadas a los cálculos de la posición y orientación de robots.

De igual manera, es necesaria la realización del análisis cinemático con el fin de conocer el área de trabajo y la base de los lineamientos del diseño, seguido por la fabricación de las piezas que conforman el modelo, con los materiales, componentes adecuados, y las pruebas finales del modelo.

Figura 2. Metodología de diseño mecatrónico implementada.



2. DISEÑO MECÁNICO DEL MANIPULADOR VERMA

El manipulador está compuesto por un sistema mecánico de cinco articulaciones activadas por motoreductores que efectúan la transmisión del movimiento mediante engranajes, correas dentadas, acoples, ejes, rodamientos, etc. (Figura 3). Las Propiedades Físicas de los eslabones son mostradas en la tabla 1, de acuerdo a los ejes de referencia y centros de masa que hacen parte de la estructura mecánica del manipulador.

Figura 3. Estructura mecánica del manipulador VERMA.

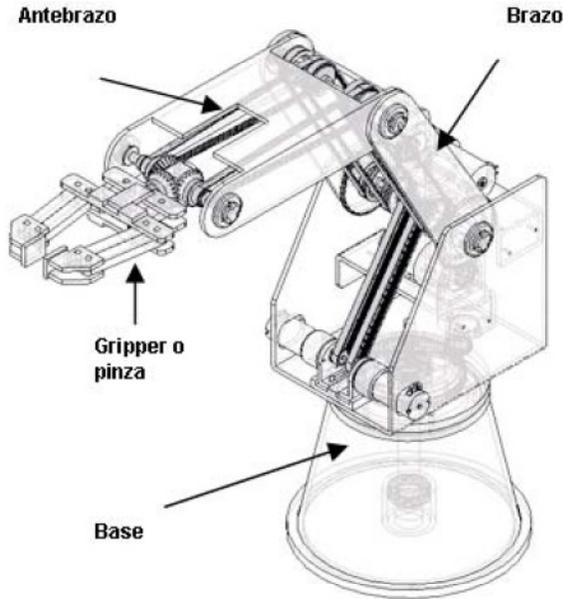


Tabla 1. Propiedades físicas de las piezas

Pieza	Masa (g/mm ³)	Volumen (mm ³)	Centro de Masa (mm)		
			X	Y	Z
Antebrazo	292.23	243528.42	2.75	9.51	0
			X	Y	Z
Brazo	342.44	285385.25	3.72	11.56	0
			X	Y	Z
Hombro	649.99	541660.30	8.51	-37.22	0
			X	Y	Z
Base Giratoria	548.90	457415.35	0	-4.79	0
			X	Y	Z

El tipo de transmisión mecánica que hace parte del manipulador automático es indirecta, donde los motores están acoplados a cada articulación a través de engranajes y correas dentadas, con el fin de asegurar la reducción en la inercia de las articulaciones, debido a que los motores están ubicados en la base principal (tabla 2) [2].

Tabla 2. Sistema de transmisiones mecánica del manipulador

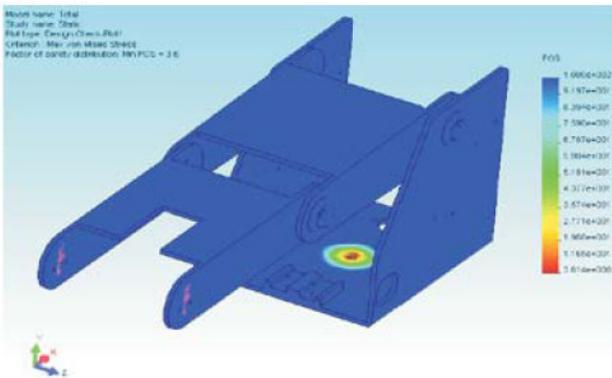
Tipo de Transmisión	Características
<p>- Articulación de la base</p>	<p>Compuesta por dos engranajes: uno acoplado directamente al eje de salida del motor y el otro acoplado a la base para el giro.</p> <p>Velocidad de salida del motor: 17 rpm; obteniendo una salida en la base de 3.93 rpm.</p>
<p>- Articulación del brazo</p>	<p>Compuesta por dos engranajes: uno acoplado directamente al motor y el otro sujetado a la articulación del hombro para su movilidad.</p> <p>Velocidad de salida del motor: 11 rpm; obteniendo una salida en el brazo de 3.666</p>
<p>- Articulación del antebrazo</p>	<p>Compuesta por un sistema dividido en dos etapas, con el fin de acoplar el brazo con el engranaje ubicado en el hombro. La unión de los engranajes se realiza por medio de una correa dentada.</p> <p>Velocidad de salida del motor: 11 rpm; obteniendo una salida en el antebrazo de 3.666 rpm.</p>
<p>- Articulación del gripper</p>	<p>El gripper posee dos grados de libertad; uno que permite subir-bajar (Pitch) y otro rotar (roll).</p> <p>El sistema consta una etapa diferencial, donde son usados piñones cónicos rectos, piñones cilíndricos rectos y correas dentadas que permiten unir los ejes que están a mayor distancia.</p>
<p>- Gripper o pinza</p>	<p>El dispositivo de sujeción (Gripper o pinza), es de tipo de dedos paralelos, movido por un tornillo de avance que está acoplado a un motor, este tornillo hace desplazar una tuerca que va acoplada a la parte móvil del Gripper uniendo los dedos o uñas de presión.</p>

2.1 ESTUDIO DE LA CARGA

Un estudio de aplicación de cargas por el método de elementos finitos (MEF) ayuda a determinar la máxima carga aplicable. El método de elementos finitos es un tópico extremadamente recurrente dentro del mundo de la computación científica y esto se refleja exactamente en su importancia como una de las principales técnicas de discretización empleadas en la simulación numérica. Este método es una técnica numérica usada entre otras para el análisis de estructuras, como es el caso del robot manipulador donde es empleada la herramienta Cosmos Works del software SolidWorks que contiene diversos módulos para la creación del modelo (preprocesamiento), el análisis del mismo (procesamiento) y la visualización de los resultados (postprocesamiento).

El análisis global de la estructura es realizado teniendo en cuenta la estructura del manipulador (acrílico), con una carga máxima a aplicar de 300gr en el extremo del antebrazo en los ejes que articulan el gripper y un peso propio constituido por todos los elementos que forman parte del modelo del manipulador. El movimiento en el orificio donde es ubicado el eje principal del manipulador que se articula con la base, es restringido. Realizando la simulación, se obtiene una escala de deformación de la estructura global de 3.23272, una fuerza resultante que soporta el eje principal de 6.0021 N (esta fuerza es debido a que este es el punto en el que se restringe el movimiento) y un factor de seguridad de la estructura global de 3.6 (figura 4)

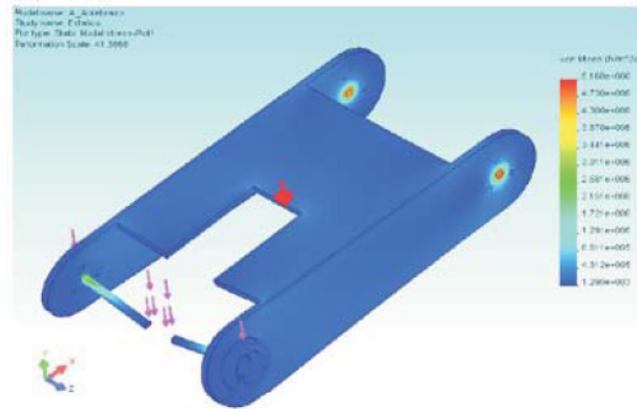
Figura 4. Factor de seguridad de la estructura Global.



2.2 ESTUDIO DEL ANTEBRAZO

Para el estudio del antebrazo es aplicada una fuerza de 3 N en los ejes que unen el antebrazo con el Gripper, correspondiente a una carga de 300 gr sujeta por el gripper, adicionalmente, es aplicada la fuerza de gravedad. El movimiento en los orificios donde se ubica el eje que articula con el brazo es restringido y la escala de deformación de la estructura global obtenida es de 41.3868 (figura 5), así mismo la fuerza resultante que soporta el eje que articula el brazo con el antebrazo es de 9.2738 N y el factor de seguridad de la estructura global es de 40.

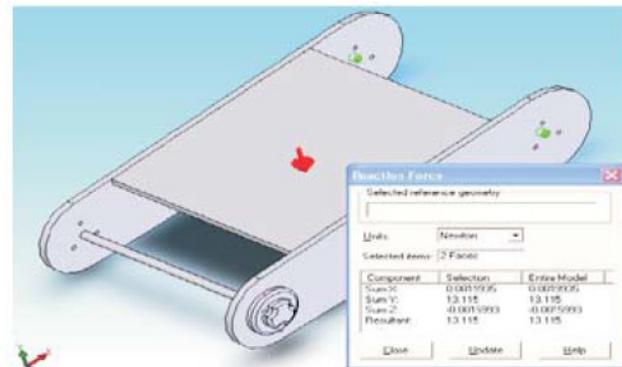
Figura 5. Análisis de deformación del Antebrazo.



2.3 ESTUDIO DEL BRAZO

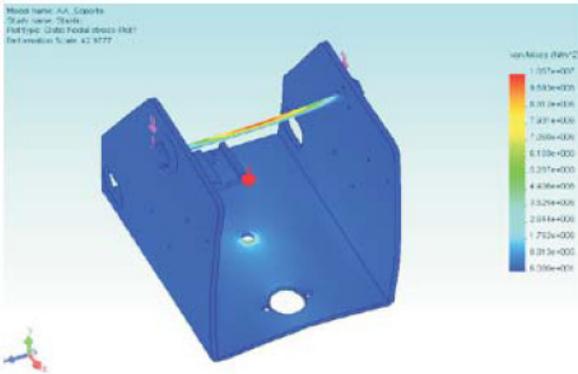
En el estudio del brazo es aplicada una fuerza de 9.2738 N en el eje que une el brazo con el antebrazo, que corresponde a la fuerza resultante en los orificios donde se ubica el eje que se articula con el antebrazo, adicionalmente es aplicada la fuerza de gravedad. La escala de deformación de la estructura global es de 41.4607, la fuerza resultante que soporta el eje que articula el brazo con el antebrazo es de 13.115 N (figura 6) y un factor de seguridad de 26.

Figura 6. Fuerza resultante del brazo



2.4 ESTUDIO DEL SOPORTE

Para el estudio del soporte, la fuerza aplicada en el eje que une el soporte con el brazo es de 13.115 N correspondiente a la fuerza resultante en los orificios donde se ubica el eje que articula con el brazo y la fuerza de gravedad, es restringido el movimiento en el orificio donde se ubica el eje principal del manipulador que articula con la base. La escala de deformación correspondiente a la estructura global es de 42.9777 (figura 7), la escala de deformación correspondiente a la estructura global es de 42.9777 y el factor de seguridad de la estructura global es de 26.

Figura 7. Análisis de deformación del soporte.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el diseño, se puede evidenciar que en el análisis de cargas de la estructura global, el factor de seguridad de la estructura es de 3.6, el cual es bajo considerando los parámetros usados para dicho análisis. En el análisis realizado a cada una de las piezas de acrílico de la estructura principal, es observable una mayor escala de distribución de deformación y un elevado factor de seguridad de cada pieza, esto es producto de que a pesar de que la estructura es bastante frágil, en conjunto es sólida.

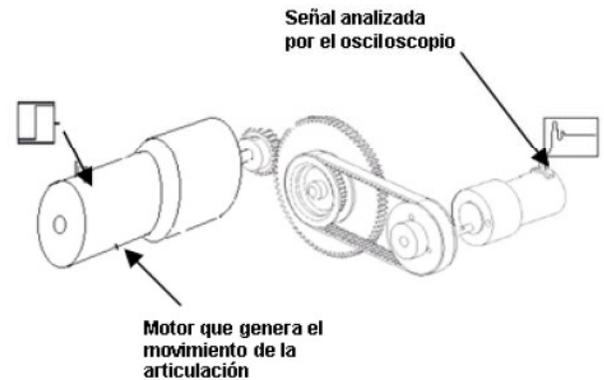
3. DISEÑO MECATRÓNICO DEL SISTEMA DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ARTICULACIONES

El prototipo de robot manipulador VERMA tal como se concibió, está dotado de una estructura física y un sistema electrónico compuesto por un conjunto de sensores que comúnmente son usados en manipuladores de este tipo (encoders, sensores de presencia y sensores reflectivos), los cuales indican la posición extrema del manipulador.

Adicionalmente, el sistema electrónico está compuesto por dispositivos como microcontroladores, sensores y actuadores que permiten la interacción con el sistema de control. En la unidad de control se encuentra un controlador lógico programable (CLP familia CPU 314C - 2DP Siemens) encargado de tomar las respectivas acciones de control evaluadas de acuerdo a la información emitida por los sensores mediante los microcontroladores y las especificaciones dadas por el operario mediante órdenes de control que son enviadas a través de la interfaz de programación Step 7 de Siemens.

Con el fin de realizar el control de las articulaciones del robot manipulador para que sea destinado a realizar trabajos automatizados con precisión y complejidad, son revisados distintos métodos para el diseño del control inclinándose por el control de cada articulación de forma independiente o "desacoplada" de las articulaciones. Para obtener el modelo matemático de las articulaciones, se selecciona el método analítico para los motores de la base y el brazo; y para la articulación del antebrazo, se fija el modelo matemático de toda la articulación de forma experimental y no la del motor independiente, debido a su simplicidad y características del sistema.

La realización de las pruebas de conexión de un motor al final de la articulación del antebrazo y la lectura de la señal que este genera, es realizada en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario al motor encargado del movimiento (figura 8).

Figura 8. Esquema de la conexión física, para observar la respuesta a la entrada escalón en la articulación del antebrazo y características de los motores

CARACTERÍSTICAS MOTOR	CARACTERÍSTICAS MOTOR
Masa: 450 gr.	Masa: 250 gr.
Reducción: 218.8:1	Reducción: 95.9:1
Alimentación: 12 V	Alimentación: 12 V
V. Angular: 2402 rpm	V. Angular: 1631 rpm
Torque: 35 mN-m	Torque: 35 mN-m
Eficiencia Reductor: 59 %	Eficiencia Reductor: 59 %
Máxima Carga: 3.53 N-m	Máxima Carga: 0.71 N-m

Con base a la respuesta obtenida en el sistema, es diseñado el modelo matemático con el fin de obtener la función de transferencia, donde la respuesta del sistema tiene característica de ser de segundo orden y describe un comportamiento de la forma de la ecuación (1) [3] [4].

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

Es necesario adquirir los valores de ξ mediante la Ecuación (2) y ω_n en la Ecuación (3), con el fin de obtener la función de transferencia dada en la Ecuación (4) para la planta (en este caso la articulación del antebrazo).

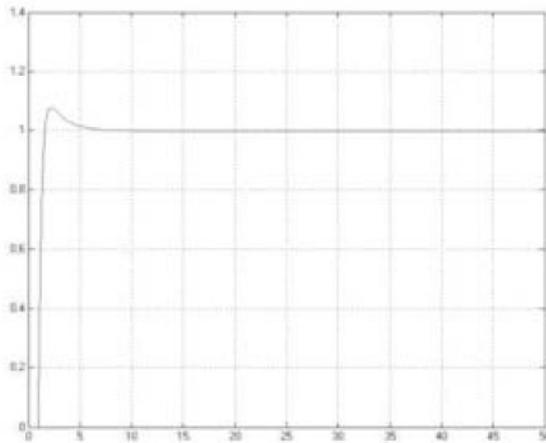
$$M_p = e^{-\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)\pi} \quad (2)$$

$$t_s = \frac{3}{\xi \cdot \omega_n} \quad (\text{Criterio del 5\%}) \quad (3)$$

$$C(s) = \frac{0.0019133324}{s^2 + 0.060240962 s + 0.0019133324} \quad (4)$$

Con el objetivo de mejorar las características de la respuesta transitoria de la articulación del antebrazo, se determinan los parámetros PID y el uso del método de sintonización de Ziegler-Nichols. Posteriormente y después de realizar una serie de pruebas, se llega a una sintonización fina en la que se obtienen los valores de $K_c = 80$, $T_i = 7.15$, $T_d = 1.7875$, los cuales permiten una mejor respuesta en el sistema como se observa en la figura (9).

Figura 9. Respuesta transitoria del sistema con controlador PID (articulación del antebrazo).



Debido a que las articulaciones de la base y brazo son movidas directamente por el respectivo motor acoplado al engranaje transmisor de movimiento, es determinada la función de transferencia de forma analítica, obteniendo la función de transferencia entre el desplazamiento del motor y el voltaje de entrada dada por la Ecuación (5).

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (K_e K_t + R_a B_m) s}$$

(5)

Las variables y parámetros del motor que intervienen en la obtención de la función de transferencia, se adquieren por medio de la hoja de características de los motores (referencia de los motores de la base y brazo: GM9X33).

Tabla 3. Parámetros y variables del motor GM9X33.

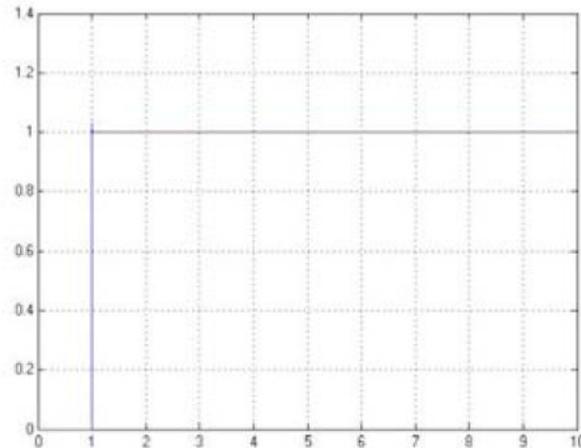
Variables y Parámetros	Datos
Inductancia de armadura	$L_a = 0.84e^{-3} \text{ H}$
Resistencia de armadura	$R_a = 1.08 \text{ } \Omega$
Constante de fuerza contraelectromotriz	$K_e = 18.9 \cdot [V/rad/s]$
Constante de torque	$K_t = 18.9 \cdot [V/rad/s]$
Momento de inercia del motor	$J_m = 3.25e^{-6} \cdot [Kg \cdot m^2]$
Coefficiente de fricción viscosa	$B_m = 2.25e^{-6} \cdot [N \cdot m/rad/s]$

Reemplazando los valores de las variables de la tabla (3), se adquiere a partir de la Ecuación (6) la función de transferencia de los motores de la base y brazo. Para la articulación de la base y brazo, se realiza el mismo procedimiento de la articulación del antebrazo, obteniendo una sintonización por el método de Ziegler-Nichols que es ajustable hasta obtener un sintonizado fino, con los valores de $K_c = 14.4$, $T_i = 8.7$, $T_d = 2.175$ (Figura 10).

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{18.9e^{-3}}{2.73e^{-9}s^3 + 3.51189e^{-6}s^2 + 3.5964e^{-4}s}$$

(6)

Figura 10. Respuesta transitoria del sistema con controlador PID (articulación base y brazo).



El movimiento de la articulación del gripper (pinza) es realizado por medio de dos servomotores, el controlador interno del servomotor es de tipo proporcional y el sistema de control que se emplea es en lazo abierto (confiando en la calibración y la precisión del servomotor). En el control del servomotor, es implementado un sistema de posicionamiento punto a punto, para evitar las cargas inerciales que se produzcan en el movimiento del gripper.

Con el fin de diseñar e implementar el controlador en el sistema de control del manipulador, es utilizado el CLP siemens CPU 314C-2DP que dentro de sus funciones posee un bloque para control PID. Los valores de los parámetros Proporcional, Integral y Derivativo que se ingresan en la función del CLP, son calculados a partir de las respuestas al escalón a cada una de las articulaciones del manipulador apoyado en la herramienta Simulink del software MATLAB [13].

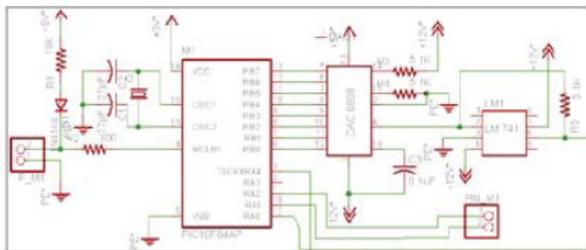
4. DISEÑO ELECTRÓNICO

La manipulación del robot desde el CLP es efectuada por medio de una interfaz electrónica de acople, diseñada para operar los servomotores y sensar la señal entregada por los encoders con que cuentan los motores DC del manipulador. El

circuito diseñado para el caso de los motores DC mostrado en la figura (11) contiene para cada uno, un microcontrolador PIC 16F84A que tiene como función sensar los pulsos enviados por los encoders y la realización de la compensación matemática, antes de ser enviados como un número binario al conversor digital análogo [5].

El conversor DAC0808 convierte el número binario en un valor de voltaje, que es enviado a las entradas análogas del CLP. Para el caso de los servomotores del Gripper se diseña un circuito que recibe del CLP una señal análoga equivalente a los grados que debe girar el Gripper, este voltaje es convertido en un número binario en el ADC 0804 para ser dirigido al puerto del microcontrolador, con el fin de enviar al servomotor una señal de 40 Hz con un ancho de pulso equivalente al valor en grados, que el usuario ingresa al programa para su posterior ejecución en el CLP.

Figura 11. Parte del esquema del circuito principal correspondiente al control de un motor DC.



Adicional a los circuitos de acople para los motores DC y los servomotores, es diseñado un circuito de potencia que permite convertir la señal de 24 V enviada por el CLP en una señal TTL y viceversa y tiene como función la alimentación de los motores DC, contando con circuitos puente H integrados, encargados de enviar a los motores DC el voltaje necesario para su activación, además de la corriente necesaria para su funcionamiento.

5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (CLP)

El controlador principal del manipulador tipo PUMA es el CLP Siemens CPU 314C 2 DP, el cual posee como software de interfaz Simatic Step 7; donde son ingresados los valores determinados por el operador mediante simulación. El controlador implementado en la programación del CLP es de tipo PID, que trabaja con un valor set-point o de referencia del valor real al elemento que se quiere controlar, a su vez, este necesita la activación de las entradas las cuales determinan el manejo del controlador. El diagrama de bloques de la programación del CLP es mostrada en la figura (12) y está dividida en seis secciones, debido a que son seis los motores que controlan el movimiento [6] [7].

En la operación del sistema, al registrar que el usuario requiere que la base se desplace un número de grados, el CLP envía una señal al motor, para indicarle que inicie su desplazamiento, el movimiento que efectúa el motor es recibido en el CLP por medio de la conversión ejecutada por el

conversor DA(Digital-Análogo). En las articulaciones del brazo, antebrazo y apertura del gripper, se opera sobre la misma estructura de programación. Por otro lado, en el control de los servomotores del gripper mostrado en la figura (13) es empleada una estructura diferente, debido a que el CLP envía una señal análoga que es acondicionada para enviar un cambio de ancho de pulso a una frecuencia de 40 Hz que es enviada a los servomotores [8].

Figura 12. Diagrama de bloques para el inicio del programa y el control del motor de la base.

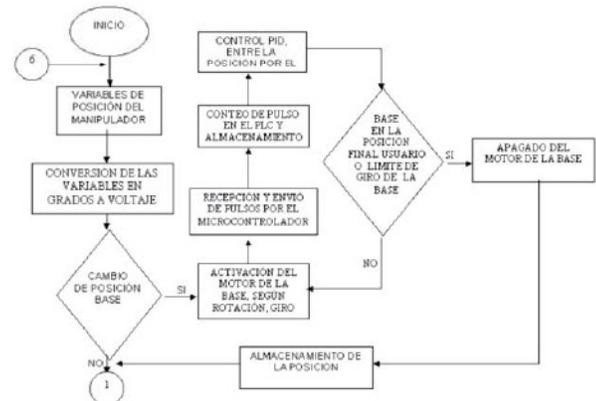
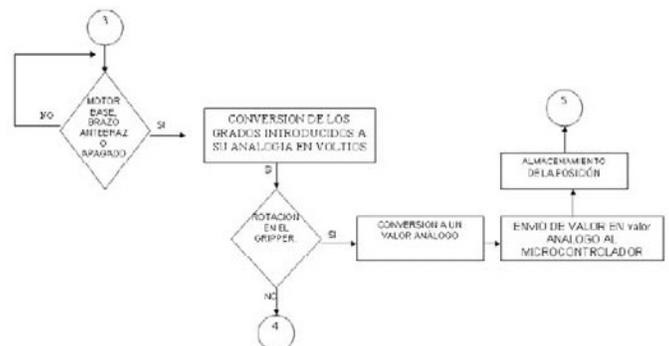


Figura 13. Diagrama de bloques para el control de los servomotores del gripper.



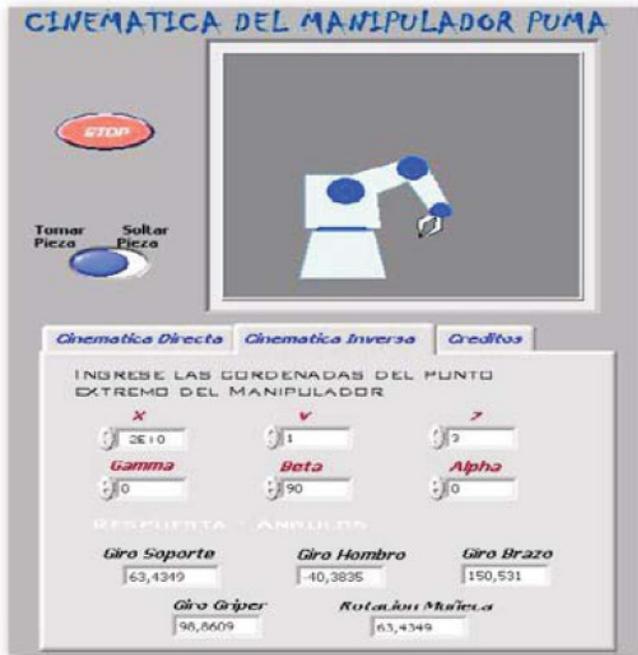
En la secuencia de movimientos del robot manipulador en su orden, son realizadas mediante etapas de la siguiente forma: Movimiento de la base, movimiento del brazo, movimiento antebrazo, giro del Gripper, rotación del Gripper y apertura del Gripper.

6. SISTEMA DE SIMULACIÓN

Para permitir al usuario realizar el cálculo cinemático y su respectiva simulación, fueron usados los parámetros de Denavit Hartenberg (DH) del robot manipulador y las matrices de transformación homogéneas asociados a un sistema de referencia [10]. El sistema de simulación está basado en el software LabVIEW de National Instruments [9], con una interfaz de usuario que posee una opción (tag) para

elegir el desarrollo del cálculo cinemático directo o el cálculo cinemático inverso, además de observar la respectiva simulación del movimiento calculado en una ventana de animación en 2D (figura 14).

Figura 14. Panel frontal en LABVIEW para el cálculo cinemático del robot manipulador



Para realizar el cálculo de la cinemática directa, el programa cuenta, con cinco string de control para ingresar los grados para cada articulación que conforman el manipulador, estos son las rotaciones del hombro, el brazo, gripper, soporte y muñeca. Para el cálculo es necesario introducir el valor en grados del giro que se desee por cada articulación, el desarrollo es automático al igual que la simulación y cuenta con la opción de la simulación del cierre y la apertura del gripper. La respuesta de la cinemática directa se entrega al usuario en coordenadas espaciales y se puede observar debajo de donde se introducen los ángulos que se desean calcular.

En la cinemática inversa del manipulador, la ventana de opción que realiza esta función es similar a la directa, se ingresa el punto espacial final en el cual se quiere ubicar el manipulador, y este desarrolla la cinemática inversa y entrega como resultado el número de grados que debe girar cada articulación del manipulador para ubicarse en dicha posición [11] [12]. La figura (15) muestra la ventana donde el usuario desarrolla la cinemática inversa y la simulación de la posición del manipulador.

En el diagrama de bloques de Labview de la figura (16) se observa el programa general desarrollado para el cálculo matemático y simulación de los movimientos del robot manipulador, a su vez, se pueden observar las dos secciones en que se divide el programa, la primera es el desarrollo cinemático y la segunda la parte encargada de la simulación de los cálculos matemáticos efectuados. La sección encargada

del desarrollo cinemático está constituida por una estructura Case, donde según la selección del operario se ejecuta la cinemática directa o cinemática inversa del robot manipulador.

El Case posee tres selecciones, cinemática directa, cinemática inversa y créditos, para los dos primeros casos según la selección realizada son observadas las respectivas entradas y salidas. Para el cálculo de la cinemática del manipulador, dentro de la estructura Case se ingresa un Matlab script que hace las veces de una función, esto debido a que las variables ingresadas entran a dicha ventana, la cual realiza un llamado al software Matlab [13] donde se realiza el respectivo programa que permite el cálculo de las variables necesarias en la cinemática directa e inversa, para posteriormente retornar dichos resultados para que el diagrama de bloques de Labview continúe el proceso que está efectuando.

En la segunda sección del diagrama de bloques, encargada de la simulación del movimiento calculado, se realizan dos procedimientos, el primero es la actualización de un vector con los parámetros calculados en la cinemática, estos parámetros son los ángulos de cada articulación. Una vez actualizado el vector, se efectúa una comparación entre el vector con los nuevos valores y el vector memoria donde se encuentran los parámetros calculados anteriormente. Debido a que el programa se efectúa dentro de una estructura While, es necesaria esta comparación para reconocer algún cambio realizado en los cálculos cinemáticos.

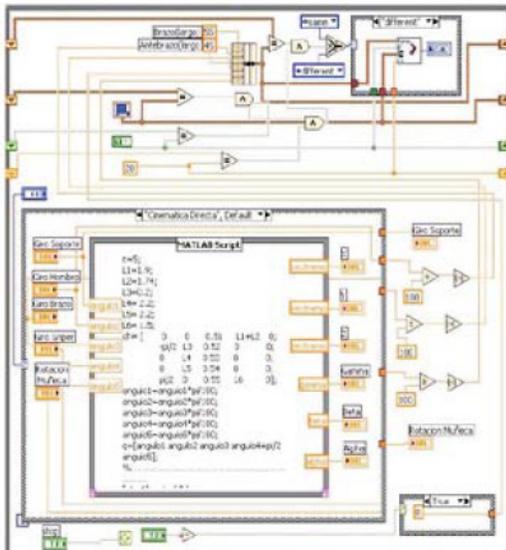
Otra parte del programa, es la sección encargada de la simulación del movimiento del manipulador en base a los valores de los grados calculados previamente por la sección del cálculo cinemático. El vector axial actualizado como el resultado de la comparación se ingresa en una estructura Case, dicha estructura cuenta con dos estados, el primero es Same, en el cual no se realiza ningún cambio, simplemente se retroalimenta el while exterior para que al continuar el ciclo tenga los parámetros necesarios y efectuar la comparación.

El segundo estado del Case es Different, conformada por una función de graficación donde se ingresa el vector actualizado axial y otros parámetros propios del programa. El resultado que retorna la función de graficación es enviada a un visualizador encargado de mostrar la simulación en la ventana del Panel Frontal.

Figura 15. Interface de simulación de la Cinemática inversa del manipulador.



Figura 16. Diagrama de bloques realizado para la simulación del manipulador.



7. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo, el seguimiento de una metodología para el proceso de diseño de un sistema con un controlador electrónico y la habilidad para incorporar el control en los diseños, es útil para dar un vistazo a los objetivos en la creación de productos y sistemas que puedan considerarse mecatrónicos, debido a que las características de este tipo de sistemas en su interés por el mejoramiento, simplificación, innovación y discusión son propias de mecanismos de precisión, de control de software mediante medios electrónicos, y de necesidad de tecnología de producción precisa y avanzada.

El análisis de la estructura del robot manipulador a través del método de elementos finitos, ayuda a determinar la máxima carga soportada por la estructura, así como los puntos de mayor acumulación de fuerzas resultantes, sin tener que realizarlos directamente a la estructura. El diseño de una tarjeta de acople y acondicionamiento de señales, permite la comunicación del robot manipulador desde el CLP Siemens CPU 314C 2 DP, a pesar de que este no cuenta con los módulos necesarios para controlar servomotores y/o para adquirir señales a la frecuencia entregada por los encoders. La implementación de la programación de Simatic Step7, sobrelleva los inconvenientes que presenta dicho programa en el manejo de variables en formatos específicos para operaciones, por ejemplo, para el envío de voltajes a través de sus salidas análogas, pero no cuenta con algunas funciones que permitan la conversión de ciertos formatos de datos.

Por último, con la obtención de los parámetros proporcional, integral y derivativo a través del método de sintonía de Ziegler-Nichols, se puede implementar para cada articulación un controlador PID en la programación del CLP, que permita aumentar la precisión y repetitividad del robot manipulador.

8. REFERENCIAS

- [1] Comerford, R., "Mecha...what?", IEEE Spectrum, Tutorial/Design, August 1994. Volume: 31, Issue: 8, p. 46-49
- [2] Calero, P. Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros. Madrid. McGraw Hill. 1999. 615 p. 84-481-2099-X.
- [3] Nise, N. Control Systems Engineering. 4a Edición. Hoboken-New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2004. 1008 p.
- [4] Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. Universidad de Minnesota. Pearson, Prentice Hall, Madrid 2003.
- [5] Tocci, R. J. Widmern N, Moss G. Digital Systems: Principles and Applications. 10th edition. USA. Prentice Hall. 2006. 976 p.
- [6] Petruzella, F.D., Programmable Logic Controllers, Mc. Graw Hill USA 1994, 320 p.
- [7] Ballcells, J. and Romeral, J.L. Autómatas programables. AlfaOmega. Quinta edición, Barcelona España 2004. 440 p.
- [8] Bolton, W., Programmable Logic Controllers, Inglaterra 2003. 3º edición, 256 p.
- [9] Lipovszki, G. and Aradi P. "Simulating complex systems and processes in labview". Journal of Mathematical Sciences, Vol. 132, No. 5, 2006. p. 629-636.
- [10] Ollero, B. Robótica: manipuladores y robots móviles. Barcelona. Marcombo. 2001
- [11] Barrientos, A. et all. Fundamentos de robótica. Universidad Politécnica de Madrid. McGraw Hill. 1997, Madrid 1997. p. 84-481.
- [12] Khatib, O., Chang K. "Manipulator control at kinematic singularities: a dynamically consistent strategy". International Conference on Intelligent Robots and Systems IEEE-Vol. 3. August 1995. p. 84.
- [13] The Math Works Inc. The student edition of Matlab versión 6.5: user's guide. Upper Saddle River. Prentice Hall. 1999.