

Diseño, fabricación y funcionamiento de un robot delta de bajo costo

■■■■
 Jacobo Sandoval-Gutiérrez, Juan Carlos Herrera-Lozada, José de Jesús Medel-Juárez, Jesús Antonio Álvarez-Cedillo, Mauricio Olguín-Carbajal

Instituto Politécnico Nacional CIDETEC, Av. Juan de Dios Bátiz, s/n. Col. Nueva Industrial Vallejo, México D.F. Tfno: +52 555729600
 jacobosandoval@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7687>

1. INTRODUCCIÓN

En la experimentación de los sistemas robóticos existe una amplia gama de estructuras, mecanismos, componentes electrónicos y herramientas computacionales. En particular, al elegir las partes mecánicas, en algunos casos las piezas son de línea, es decir, las dimensiones, tipo de fabricación, color, textura y todas las demás características ya están predeterminadas. Sin embargo, en los casos de requerir piezas especiales, se recurre a métodos de manufactura, adaptación de piezas y otras alternativas que solucionen la problemática. En este sentido, algunos tipos de fabricación y material utilizado en los robots son: orugas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) inyectado, materiales de aluminio o acero inoxidable para una plataforma móvil [1], fabricación con impresoras 3D de manos robóticas [2] y plásticos en robots manipuladores [3]. En la parte electrónica, algunos experimentos sobre los robots, se basan en

la reducción del coste, al utilizar plataformas comerciales de software y hardware con Arduino®, Raspberry Pi® [4]. En el caso de Robot Operating System [1] y RobotC® [5] se usan como herramientas de control y simulación de robots, por otra parte, los entornos de realidad virtual en robótica [6] también se han desarrollado.

Invariablemente, en las características de los trabajos citados anteriormente, se dificulta la posibilidad de reproducir los robots para futuras investigaciones o propósitos, ya que no se propone una compatibilidad entre múltiples herramientas de software y hardware, también no se describe la posibilidad de replicar los diseños de manera práctica y económica. Por tanto, en la presente investigación, dicha problemática se aborda de manera analítica, al proponer una metodología de diseño, fabricación y operación de un robot en particular, que permita reproducirse a un bajo coste con herramientas compatibles entre sí. La metodología descrita en la Fig. (1) está orientada a la utilización de las herramientas emergentes; como las impresiones 3D con la técnica de la fabricación aditiva [7] para los elementos mecánicos, sistemas embebidos para la etapa de control electrónico y la programación con las herramientas de software libre.

Las fases de la metodología de la Fig. (1) son desarrolladas en el apartado 2, con un diseño preliminar de un robot delta que considera las restricciones

generales en base a las herramientas y la materia prima; el diseño en función de la geometría; la fabricación con diferentes orientaciones de impresión, dos tipos de resolución y material; análisis de la posición sobre una trayectoria específica; las implementaciones de los algoritmos evaluando el error existente entre el prototipo físico y el simulado. En el apartado 3, 4 y 5 se muestran los resultados, la discusión y conclusiones del trabajo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. DISEÑO PRELIMINAR

Un robot paralelo es definido como un mecanismo conectado a una base fija por medio de al menos dos cadenas cinemáticas [4], algunas configuraciones clásicas de los mecanismos paralelos reportados son: delta por Clavel, delta lineal, cartesiano, mecanismo de Maryland por Tsai y orthoglide [8]. El robot delta [9,10] propuesto corresponde a un sistema de seis eslabones conectados, en el extremo superior con tres servomotores y al otro extremo una plataforma móvil, tal como se muestra en la Fig. (2).

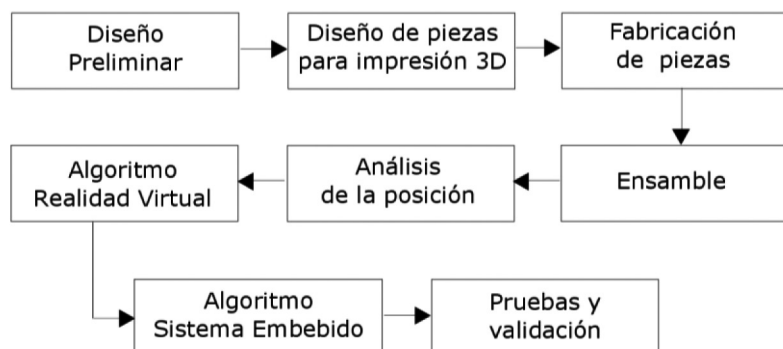


Fig. 1: Metodología desarrollada para un prototipo de robot

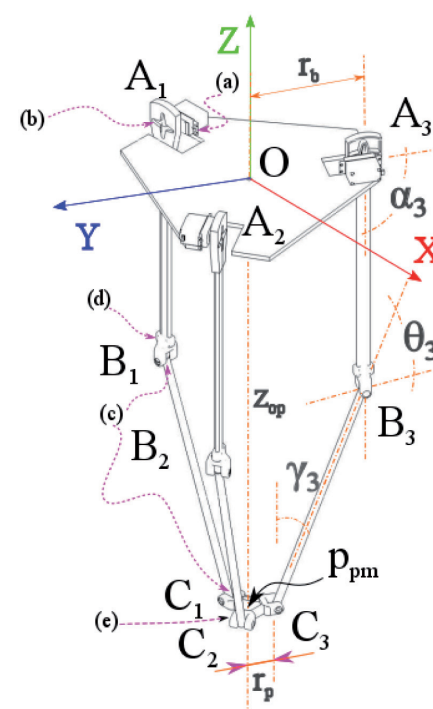


Fig. 2: Configuración del robot delta

Las condiciones generales para el diseño, se determinaron por la capacidad de torque del servomotor, el volumen máximo de la impresora, la resistencia del material de las piezas en función del grosor, la estructura necesaria para el soporte del sistema y el número de grados de libertad de cada unión. En la parte electrónica, se ha considerado la energía de operación, la cantidad de puertos y el tipo de comunicación. Las variables utilizadas para la selección del diseño se muestran en la Tabla 1.

En consideración a todas las piezas que moverá cada servomotor, se ha definido un peso aproximado de 20 g.

Con ello, el consumo por cada servomotor es de 5 V y 0.1 A, dicha energía la proporciona el puerto USB de un computador personal. Así mismo, a partir de la Fig. (2) se describen las variables en la Tabla 2, que permiten establecer las relaciones geométricas del sistema.

En las consideraciones generales, se propone que la base y la plataforma móvil sean paralelas entre sí, es decir una matriz de rotación constante.

2.2. DISEÑO DE PIEZAS PARA IMPRESIÓN 3D

Para articular el mecanismo con

base a la Fig. (2), es necesario unir los servomotores a la base fija con un ángulo, Fig. (3a); unos bíceps Fig. (3b) para unir el servomotor con los eslabones superiores en A_i ; unas rótulas Fig. (3c) y una horquilla Fig. (3d) en el caso de las uniones B_i , dado que se requieren tres grados de libertad; y por último, la unión de la plataforma móvil Fig. (3e) en la unión C_i .

Para el diseño de las piezas que son fabricadas por medio de la técnica aditiva de impresión 3D, es necesario considerar los factores de grosor de capa; tipo de densidad: hueca, fuerte y sólida; el patrón de impresión como la de tipo

Elemento	Variable	Valor
Servomotor analógico HD	Torque	0.35 Kg*m
	Voltaje mínimo y máximo	4.8-6.0 V
	Frecuencia de trabajo	50 Hz
	Ángulo mínimo y máximo	-90°, +90°
Impresora Cube	Número de cabezales	1
	Resolución de la pared de impresión	0.5 mm
	Tipos de material de fundición	Limitado a ABS y PLA
	Volumen de impresión	0.15 m (largo)
		0.15 m (ancho)
		0.15 m (alto)
Impresora 3D-Touch	Número de cabezales	2
	Resolución de la pared de impresión	1 mm
	Tipos de material de fundición	Diversos polímeros desde 100° C hasta 260 ° C
	Volumen de impresión	0.185 m (largo)
		0.20 m (ancho)
		0.273 m (alto)
Tarjeta MSP430	Número de puertos con PWM	3
	Comunicación UART	1
	Voltaje de operación	3.3 V
Eslabón	Peso	2 g

Tabla 1. Parámetros base del diseño

Variable	Descripción	Variable	Descripción
A_1, A_2, A_3	Unión en el actuador 1,2,3	r_b	Radio de la base
B_1, B_2, B_3	Unión de eslabones 1,2,3	r_p	Radio de la plataforma móvil
C_1, C_2, C_3	Unión con la plataforma móvil	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Ángulo en la unión A_1, A_2, A_3
AB_1, AB_2, AB_3	Eslabón superior de 1,2,3	$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	Ángulo en la unión B_1, B_2, B_3
BC_1, BC_2, BC_3	Eslabón inferior de 1,2,3	$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	Ángulo en la unión C_1, C_2, C_3
O	Origen de todo el sistema	Z_{op}	Distancia de origen a la plataforma móvil si $x=y=0$

Tabla 2. Descripción de las variables del robot delta

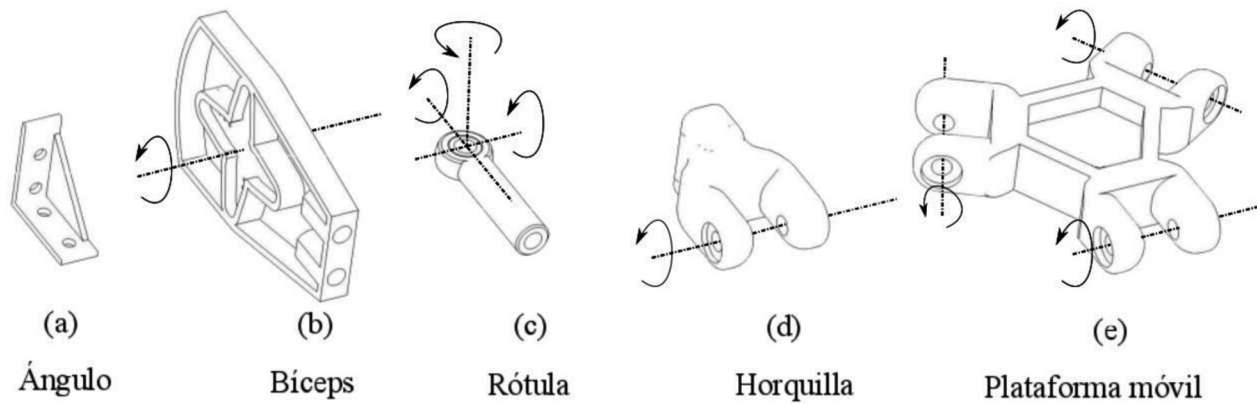


Fig. 3: Piezas propuestas para la fabricación mediante la impresión 3D

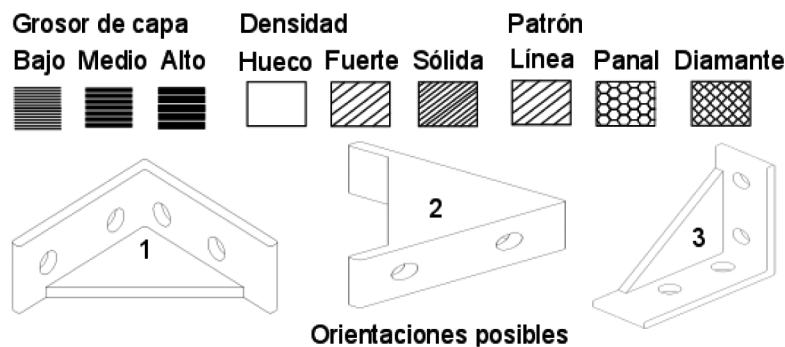


Fig. 4: Factores a considerar para el diseño de impresión 3D

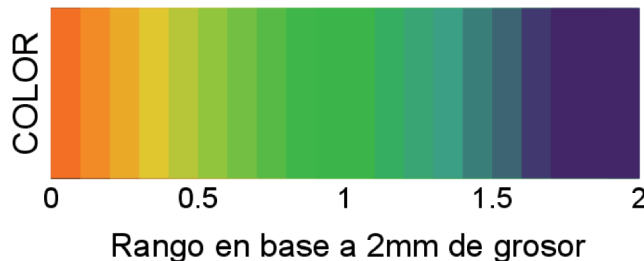


Fig. 5: Umbrales en el espectro de análisis de pared, analizado para las impresoras cube y 3D-Touch

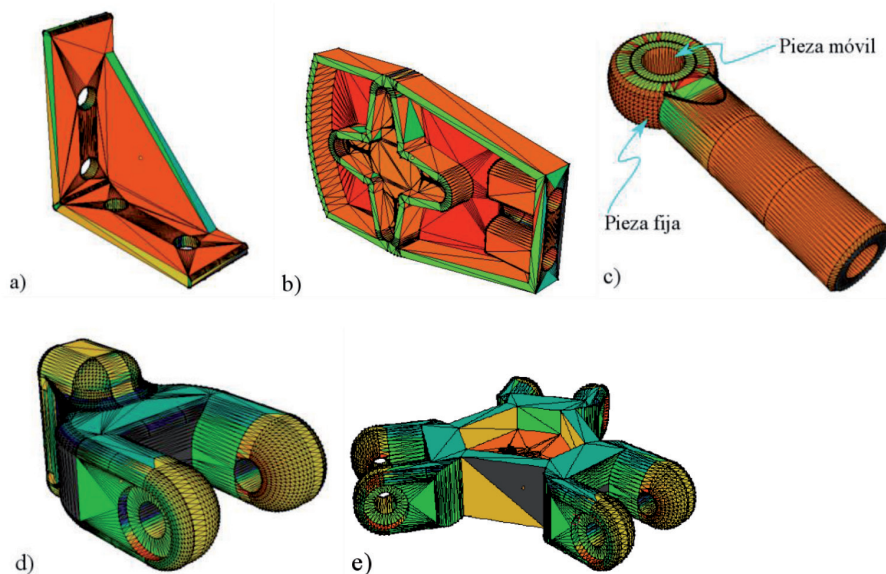


Fig. 6: Tonalidades de las piezas diseñadas

línea, panal o diamante y también la orientación debe especificarse. De manera general, las posibles condiciones de diseño se muestran en la Fig. (4).

De manera práctica, se ha empleado la herramienta *3D printing Toolbox*, que calcula el grosor de cada malla que conforma la pieza, con ello, se da una estimación de la calidad resultante debido a la conversión del formato (*.stl) al formato de la impresión (*.bfb) o (*.cube). Considerando un grosor de pared de 2 mm, las tonalidades obtenidas se encuentran entre los límites de 0 a 2, ya que representan los valores más adecuados para obtener las piezas con la calidad requerida, tal como se muestra en la Fig. (5).

Las tonalidades resultantes sobre las piezas diseñadas de la Fig. (6), muestran que el ángulo, el bíceps y la rótula en la Fig. (6a, 6b, 6c) tiene un rango entre de 0 a 1, esto representa que la pieza se ajusta a las dimensiones requeridas sin utilizar material excesivo; mientras la horquilla y la plataforma móvil en la Fig. (6d, 6e) también satisfacen las dimensiones, pero utilizan material en forma excesiva.

En la Fig. (6c) se muestra en forma particular el diseño de una rótula que consiste en ensamblar una pieza móvil dentro de una pieza fija, al terminar el proceso las dos superficies deben quedar separadas una de la otra por al menos 0.15 mm para que sea funcional.

2.3. FABRICACIÓN DE PIEZAS Y ENSAMBLE

Se han utilizado dos tipos de impresoras de la marca 3DSystems®, en el modelo 3D-Touch se ha utilizado la impresión de material PLA con el formato (*.bfb) y para el modelo Cube material ABS con el formato (*.cube). En la Ta-

Pieza	Ángulo		Bíceps		Horquilla		Rótula		Plataforma móvil	
Impresora	3D-Touch	Cube	3D-Touch	Cube	3D-Touch	Cube	3D-Touch	Cube	3D-Touch	Cube
tc(s)	14	5	87	34	33	33	17	13	74	37
tf(s)	840	672	6780	5736	4560	3739	900	810	10500	8400
Vp (m³)	1x10 ⁻⁷	1x10 ⁻⁷	87x10 ⁻⁸	81 x10 ⁻⁸	56 x10 ⁻⁸	56 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁷	11 x10 ⁻⁸	125 x10 ⁻⁷	125 x10 ⁻⁷
P(USD)	\$0.10	\$0.20	\$0.73	\$1.5	\$0.5	\$1.2	\$0.10	\$0.30	\$1.14	\$2.48
Tiempo total de todas las piezas con archivos *.BFB 23580 segundos y *.Cube 19356 segundos.										

Tabla 3: Resultados en tiempo de compilación, fabricación, volumen y precios (tiempo de compilación tc(segundos), de fabricación tf(segundos), Volumen de la pieza Vp(metros cúbicos), precio P(dólares americanos), impresora 3D-Touch y Cube

bla 3, se muestran los resultados de las piezas diseñadas con sus tiempos de fabricación, costos y dimensiones.

El tiempo de fabricación se ve afectado por el tipo de orientación, número de piezas fabricadas al mismo tiempo y la separación respectiva entre ellas, ya que dependiendo de estos factores, los desplazamientos aumentan en cada

la 3D-Touch, también se puede resaltar que la la segunda impresión es de un costo menor, lo que es viable en pruebas iniciales. En los dos casos, es funcional para el propósito propuesto, las piezas de la Fig. (7) muestran los resultados obtenidos de la impresión.

De la Fig. (7) se observa la plataforma móvil, las rótulas y la horquilla como

piezas con mayor calidad, ya que han sido fabricadas en material ABS con la impresora Cube, mientras el bíceps no consigue buenos acabado pero si funcionalidad, debido a que ha sido fabricado con la impresora 3D-Touch con material PLA transparente. En otras pruebas de fabricación, la rótula Fig. (6e). con la impresora 3D-Touch no funciona para la

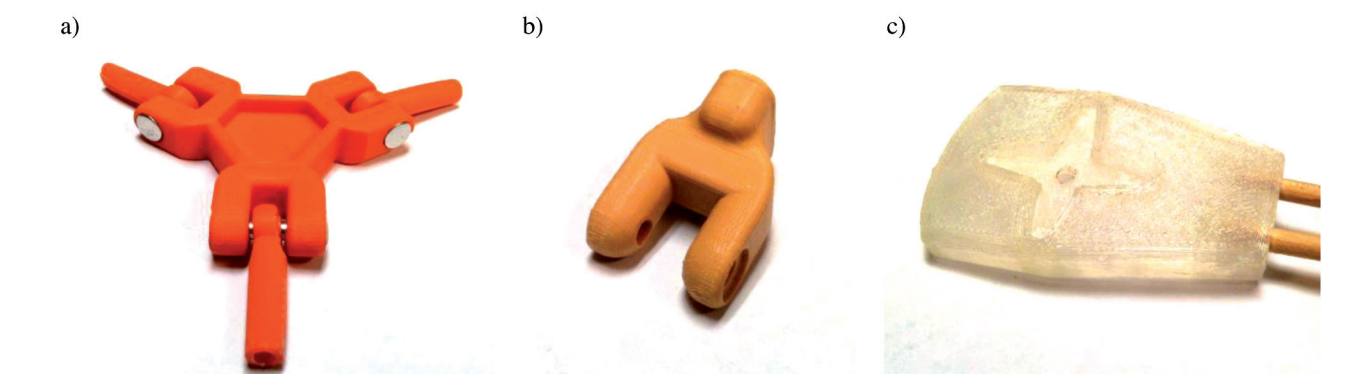


Fig. 7: Piezas impresas con diferentes materiales: a) Plataforma móvil y rótula (ABS), b) Horquilla (ABS). c) Bíceps en material (PLA)

capa de adhesión, éste factor también influye en la calidad, debido a las variaciones de temperatura entre capa y capa. La impresora Cube es de mayor calidad y velocidad en comparación con

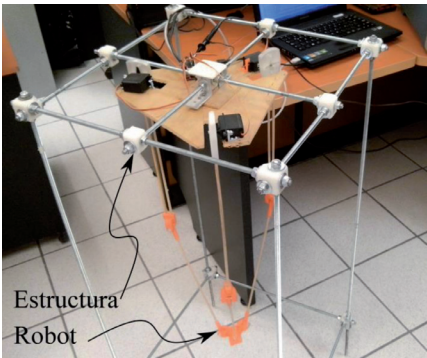


Fig. 8: Ensamble final del robot delta

Elemento	Variable	Valor
Servomotores	Ángulo inicial (α_i)	90°
	Frecuencia PWM	131 Hz
	Periodo de trabajo inicial	480 μ s
	Voltaje de operación	5 V
Eslabones superiores	Longitud (AB)	0.36 m
Eslabones inferiores	Longitud (BC)	0.335 m
Radio de la base	Distancia r_b	0.15 m
Radio de la plataforma móvil	Distancia r_p	0.035 m
Posición inicial de la plataforma móvil	Distancia Z_{op}	0.675 m

Tabla 4: Parámetros utilizados para el análisis de la posición

$$k_1 \cos \alpha_i + k_2 \sin \alpha_i + k_3 = 0 \quad (1)$$

$$k_1 = 2AB(y + r_b - r_p) \quad (2)$$

$$k_{1_2} = -AB(\sqrt{3}(x + \sqrt{3}/2(r_p - r_b)) + y + (1/2(r_p - r_b))) \quad (3)$$

$$k_{1_3} = AB(\sqrt{3}(x - \sqrt{3}/2(r_p - r_b)) - y - (1/2(r_p - r_b))) \quad (4)$$

$$k_{2_1} = k_{2_2} = k_{2_3} = 2zAB \quad (5)$$

$$k_{3_1} = x^2 + y^2 + z^2 + (r_b - r_p)^2 + AB^2 + 2y(r_b - r_p) - BC^2 \quad (6)$$

$$k_{3_2} = x^2 + y^2 + z^2 + (\sqrt{3}/2(r_p - r_b))^2 + (1/2(r_p - r_b))^2 + \quad (7)$$

$$AB^2 + 2(x(\sqrt{3}/2(r_p - r_b)) + y(1/2(r_p - r_b))) - BC^2$$

$$k_{3_3} = x^2 + y^2 + z^2 + (\sqrt{3}/2(r_p - r_b))^2 + (1/2(r_p - r_b))^2 + \quad (8)$$

$$AB^2 + 2(-x(\sqrt{3}/2(r_p - r_b)) + y(1/2(r_p - r_b))) - BC^2$$

$$K_i = \tan(\alpha_i / 2); \cos \alpha_i = \frac{1 - K_i^2}{1 + K_i^2}; \sin \alpha_i = \frac{2K_i}{1 + K_i^2} \quad (9)$$

$$k_1(1 - K_i^2) + k_2(2K_i) + k_3(1 + K_i^2) = 0 \quad (10)$$

$$\alpha_i = 2 \tan^{-1}(K_i) = \cos^{-1} \frac{1 - K_i^2}{1 + K_i^2} = \sin^{-1} \frac{2K_i}{1 + K_i^2} \quad (11)$$

$$B_{rp_1} = \{0 \quad -r_b - AB \cos \alpha_1 + r_p \quad -AB \sin \alpha_1\}^T \quad (12)$$

$$B_{rp_2} = \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2}(r_b + AB \cos \alpha_2) - \frac{\sqrt{3}}{2}r_p \quad \frac{1}{2}(r_b + AB \cos \alpha_2 - r_p) \right\} \quad (13)$$

$$B_{rp_3} = \left\{ -\frac{\sqrt{3}}{2}(r_b + AB \cos \alpha_3) + \frac{\sqrt{3}}{2}r_p \quad \frac{1}{2}(r_b + AB \cos \alpha_3 - r_p) \quad -AB \sin \alpha_3 \right\}^T \quad (14)$$

$$(x - x_{rp_i})^2 + (y - y_{rp_i})^2 + (z - z_{rp_i})^2 = BC_i^2 \quad (15)$$

$$y = -k_b + \sqrt{k_b^2 - 4k_a k_c / 2k_a}$$

$$x = -a_4 y + a_5$$

$$z = -a_6 y + a_7$$

$$\text{En donde: } a_{11} = 2(x_{rp_3} - x_{rp_1}), a_{12} = 2(y_{rp_3} - y_{rp_1}), a_{13} = 2(z_{rp_3} - z_{rp_1}), a_{21} = 2(x_{rp_3} - x_{rp_2}), \quad (16)$$

$$a_{22} = 2(y_{rp_3} - y_{rp_2}), a_{23} = 2(z_{rp_3} - z_{rp_2}), b_1 = -x_{rp_1}^2 - y_{rp_1}^2 - z_{rp_1}^2 + x_{rp_3}^2 + y_{rp_3}^2 + z_{rp_3}^2,$$

$$b_2 = -x_{rp_2}^2 - y_{rp_2}^2 - z_{rp_2}^2 + x_{rp_3}^2 + y_{rp_3}^2 + z_{rp_3}^2, a_1 = a_{11} / a_{13} - a_{21} / a_{23}, a_2 = a_{12} / a_{13} - a_{22} / a_{23},$$

$$a_3 = b_2 / a_{23} - b_1 / a_{13}, a_4 = -a_2 / a_1, a_5 = -a_3 / a_1, a_6 = a_{21} a_4 - a_{22} / a_{23}, a_7 = b_2 - a_{21} a_5 / a_{23}.$$

escala propuesta, esto como consecuencia de la conversión entre formatos. Con relación a los ángulos, el grosor de pared propuesto no resiste las fuerzas que genera el torque del servomotor a la base fija y por tanto, se han remplazado por ángulos de aluminio.

Para el ensamble se ha utilizado un soporte de estructura cúbica ajustable a diferentes alturas, por medio de un sistema de tornillos unidos a los cubos sólidos fabricados en PLA con la impresora 3D-Touch. En la parte superior con un soporte de cruz, se sujeta la base superior fija del robot delta. En la Fig. (8) se muestra el ensamble obtenido en forma real.

2.5. ANÁLISIS DE LA POSICIÓN

Para realizar el controlador y estimar las posiciones del sistema en lazo abierto, se han considerado los parámetros que se muestran en la Tabla 4.

De acuerdo a las consideraciones generales descritas en la sección 2 y representadas en la Fig. (2), la variable para la posición de la plataforma móvil es $p_{pm} = \{x \ y \ z\}^T$ y cuando $x = y = 0$ aplica $z_{op} = \{0 \ 0 \ z\}^T$.

En el análisis de la cinemática inversa en base a [9,10] se debe satisfacer (1) para cada $i = 1, 2, 3$.

En donde, las constantes se calculan por medio de (2) a (8).

Considerando la sustitución de la tangente del ángulo medio en (1) se obtiene (9).

Al sustituir en (9) en (1) se obtienen la ecuación (10) en términos de K_i .

Al solucionar (10) para cada $i = 1, 2, 3$ se obtienen las K_i para las identidades en (9), por lo tanto, se conoce α_i con (11).

En el análisis de la cinemática directa en base a [9,10] se obtienen al encontrar la posición de B_i con respecto a los ángulo α_i desplazando el radio de

$$z = -AB \sin \alpha_i + BC \sin \gamma_i, x = y = 0 \quad (17)$$

En donde: $\gamma_i = \sin^{-1}(r_b - r_b + AB \cos \alpha_i / BC)$ y $\theta_i = 180 - \gamma_i + \alpha_i$

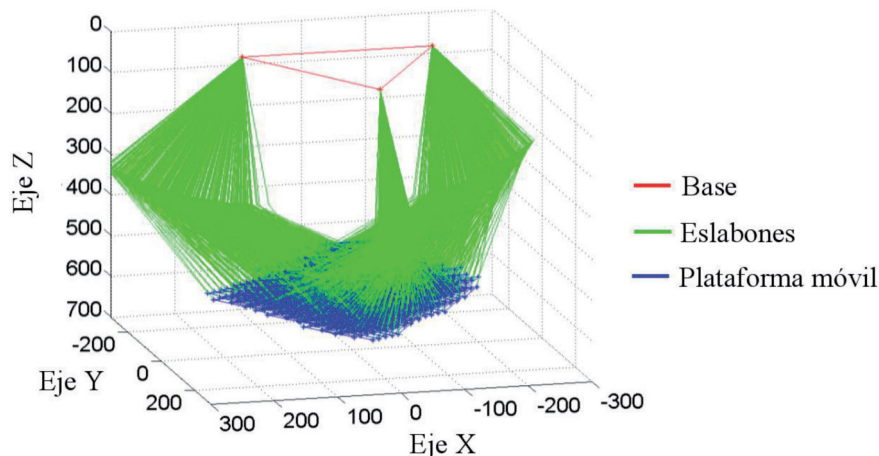


Fig. 9: Simulación del espacio de trabajo en base a $\alpha_i \in [-90^\circ, -55^\circ]$

Encabezado:

Motor_de_juegos
Blender_python
Funciones_matemáticas.

Configuraciones:

Comunicación_serial
Archivo_destino

Datos:

Inicializar_variables.
Offset_de_Objetos

Inicio:

Ciclo:

Esperar_eventos_de_teclado
Espacio_de_trabajo
 Si: Evento_de_tecla_giro(+) & Espacio_de_trabajo
 Entonces Incrementar_alpha
 Mandar_instrucción_serial
 Escribir_en_archivo
 Si: Evento_de_tecla_giro(-) & Espacio_de_trabajo
 Entonces Decrementar_alpha
 Mandar_instrucción_serial
 Escribir_en_archivo
Ir_a_ciclo

Función espacio de trabajo: Calcular posición_(t+1)_de_la_plataforma_móvil

Función serial: Enviar_dato

Escribir archivo: Abrir_escribir_en_siguiente_línea_la_posición.

la plataforma móvil r_p con (12), (13) y (14) derivado de (1).

De lo anterior, se debe satisfacer que la plataforma móvil p_{pm} forma una esfera con un radio BC_i con respecto a las posiciones B_{pp} , de tal manera que al solucionar las ecuaciones de (15) obtenemos la solución p_{pm} en (16).

Las ecuaciones descritas en (16) no aplican cuando el valor es Z_{op} , en este caso se aplica (17).

Al satisfacer (17) se han definido las orientaciones para $\alpha_i \in [-90^\circ, -55^\circ]$, respectivamente $\theta_i \in [69,7^\circ, 51,3^\circ]$ y $\gamma \in [20^\circ, 73,6^\circ]$. Con ello, se realizaron las simulaciones de la cinemática inversa y directa, para obtener el espacio de trabajo, tal como se muestra en la Fig. (9).

2.6 IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO EN SOFTWARE Y HARDWARE

La herramienta elegida para realizar el ambiente virtual es Blender®, con la modalidad de motor de juegos que consta de entradas, controladores y salidas. Para el controlador se escribió el programa en el lenguaje Python; para dar movimiento al mecanismo se ocupó la configuración tipo armadura, que consta de pivotes (uniones A_i , B_i y C_i) y huesos (eslabones AB_i y BC_i); y por último, con la comunicación serial (pyserial) se obtuvo una interfaz con el controlador electrónico. El Pseudocódigo del programa implementado para evaluar la trayectoria de z_{op} se describe a continuación.

Para el controlador físico del robot se ha empleado la tarjeta MSP430 con una programación en lenguaje C sobre IAR Systems. La configuración de los puertos asignados son: tres puertos (P1.4, P2.1, P2.4) para el PWM, dos puertos para la comunicación serial, un transmisor y un receptor (P1.1, P1.2) y para la calibración por medio del Convertidor Analógico Digital de 10 bits de resolución (P1.4).

3. RESULTADOS

En la Tabla 5, se muestran los resultados obtenidos de los cálculos de la posición simulada de α_i con incrementos de un grado, en comparación con las mediciones reales efectuadas con un medidor de distancia laser. Los límites de operación son de -90° a -55° y un

$-\alpha$	Z_{op} Simulado (m)	Z_{op} Real (m)	Error entre Z_{op} simulado y Z_{op} real
90°	0.675	0.667	+0.008
85°	0.660	0.657	+0.003
80°	0.638	0.639	-0.0001
75°	0.596	0.600	-0.004
70°	0.557	0.558	-0.001
65°	0.495	0.497	-0.002
60°	0.426	0.430	-0.004
55°	0.385	0.389	-0.004

Tabla 5: Valores obtenidos para el desplazamiento en z del plataforma móvil en simulación y real

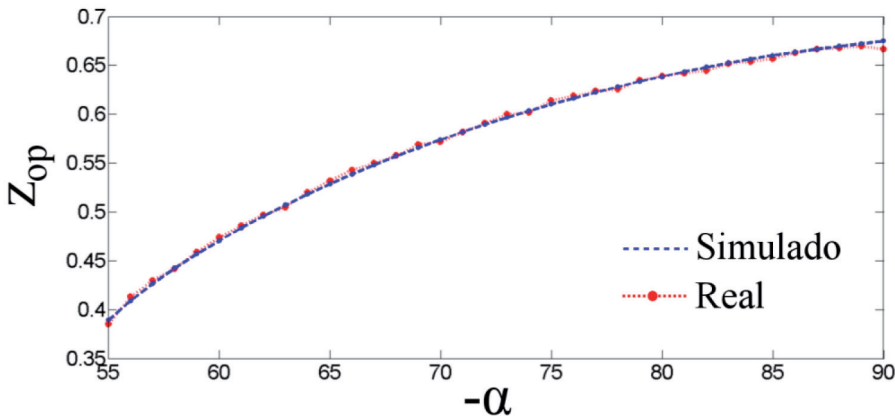


Fig. 10: Comparación de Z_{op} entre el valor simulado y el valor real

desplazamiento de la trayectoria máxima de 0.282 m con un error máximo de +0.008m.

En la comparación que se muestra en la Fig. (10) se observa que las variaciones en lazo abierto son aceptables para el caso la trayectoria propuesta en Z_{op} .

En la configuración electrónica, la frecuencia ajustada es de 131 Hz, con

valores iniciales del ciclo de trabajo en +48μs para un $\alpha_i = -90$, teniendo una razón de cambio de 8 μs por cada grado. La configuración utilizada para la comunicación serial es (9600 bps, 8, n, 1) con tres valores: incremento (1), decremento (2) y paro (0). El sistema de alimentación opera desde el voltaje que proporciona el puerto USB, sin necesidad de fuente externa. En la Fig. (11) se

observa el ambiente virtual, el sistema real, la etapa electrónica y las mediciones resultantes de las pruebas finales.

4. DISCUSIÓN

La metodología propuesta para el diseño de robots, da la flexibilidad de realizar ajustes en todo momento, ya que se tiene la factibilidad de cambiar, sustituir piezas, cambiar las formas o dar nuevas dimensiones; en comparación con las restricciones que suponen las arquitecturas cerradas o los diseños revisados.

En relación al diseño de piezas y su fabricación 3D, no es un proceso automático, ya que se requiere de un análisis previo de las características de la impresora, materiales y sus propiedades en grosor, orientación, tipo de patrón y densidad. Con respecto a las herramientas de software abierto como Blender y el hardware embebido, abren la posibilidad de ser compatibles y económicos, sin embargo, requiere profundizar en la programación, en relación a las herramientas comerciales.

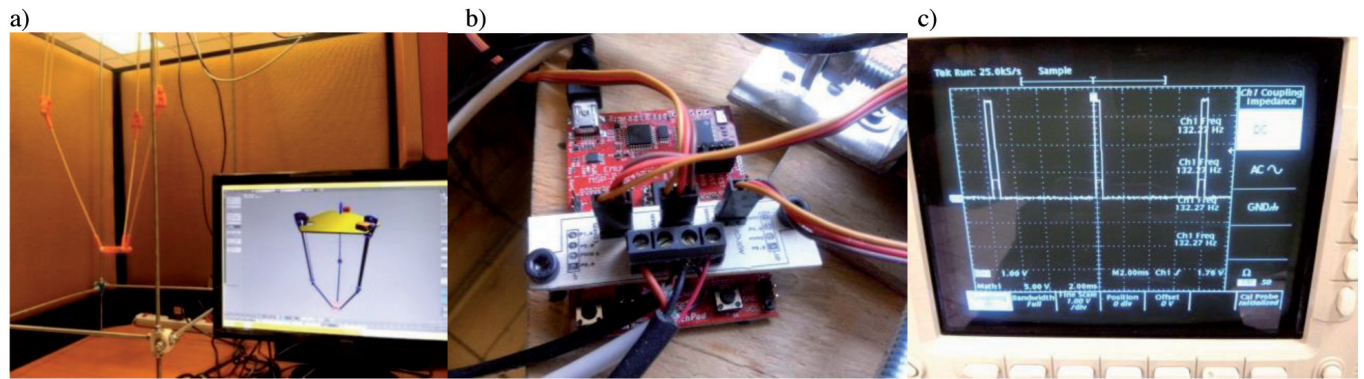


Fig. 11: Resultados finales, a) ambiente virtual y real, b) Etapa electrónica y c) Medición de la frecuencia

Con respecto a las rutinas de movimiento que se propusieron, las piezas si cumplen con lo propuesto, salvo el ángulo de ABS no funcionó debido al grosor, por otro lado, el ambiente de simulación y la comunicación son 100% compatibles.

5. CONCLUSIONES

La fabricación de las piezas para el robot utilizando materiales ABS o PLA es factible, proveen un desempeño similar, aunque PLA muestra una textura más rugosa. En el caso de la rótula que ofrece 3 grados de libertad si es afectado por el tipo de formato de impresión, así mismo, sólo se requiere un tiempo fabricación de 900s (tiempo reducido en comparación con otras piezas) y en comparación con los modelos comerciales que son de uso automotriz o industrial, se obtuvo un coste menor utilizando la técnica de impresión 3D.

La ventaja de utilizar un software como Blender® para el diseño 3D radica en tener las funciones programables en un sólo script que permita calcular, escribir archivos y tener cualquier interface como la utilizada (serial), además de ser compatible con Windows®, iOS o Linux para la simulación y control. La utilización de una tarjeta embebida MSP430 con capacidades de interrupción para PWM, serial y convertidor analógico digital en un solo chip, es una ventaja en semejanza con otras de la misma gama, como Arduino, ya que resulta ser al menos un 40% más económico.

Las etapas de la metodología del diseño propuesto se han cumplido y las trayectorias probadas satisfacen el funcionamiento básico del robot, demostrando una alternativa de realizar robots que no se restrinja a un cierto tipo de piezas, componentes electrónicos o programas computacionales. El costo aproximado del robot delta en la versión 1.0 es de un costo de \$70 USD + 19USD de la estructura, siendo una cantidad accesible para un prototipo que tiene incluido las etapas electrónicas y de programación. En el trabajo futuro se considera optimizar el robot para aplicaciones específicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del programa de Cátedras CONACYT 1507, CIDETEC-IPN, CIC-IPN y a los proyectos SIP 2014728 y 20144053.

PARA SABER MÁS

- Araújo A, Portugal D, Couceiro MS, et al. "Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ROS". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. Vol.11-3 p.15-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.009>
- Kappassov Z, Khassanov Y, Saudabayev A. "Semi-Anthropomorphic 3D Printed Multigrasp Hand for Industrial and Service Robots". *Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on*. p.1697-1702. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2013.6618171>
- Pomares J, García GJ, Perea I, et al. "Cámara Virtual de Referencia: Una Aproximación para el Guiado Combinado de Robots Manipuladores mediante una Única Cámara". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. Vol.9-3 p.14-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.004>
- Vallés M, Cazalilla JI, Valera Á, et al. "Implementación basada en el middleware OROCOS de controladores dinámicos pasivos para un robot paralelo". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol.10 p.96-103. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.11.009>
- Valera A, Soriano A, Vallés M. "Plataformas de Bajo Coste para la Realización de Trabajos Prácticos de Mecatrónica y Robótica". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol. 11-4 p.363-376. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.09.002>
- Calvin KL, Vincent GD, Chui CC. "Perception of safe robot idle time in virtual reality and real industrial environments". *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol.39-5 p.807-812. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2009.01.003>
- Espalin D, Muse DW, MacDonald E, et al. "3D Printing multifunctionality: structures with electronics". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol.72-

5-8 p.963-978. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5717-7>

- Yañez-Valdez R. "Bases para el desarrollo de Micromáquinas Herramienta Paralelas". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol.11-2 p.212-223. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.004>
- López M, Castillo E, García G, et al. "Delta robot: inverse, direct and intermediate Jacobians". *J. Mechanical Engineering Science*. Vol.220 p. 103-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/095440606X78263>
- Xin-Jun L, Jinsong W, Kun KO, et al. "A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace". *Journal of Intelligent and Robotic System*. Vol.39 p.209-225. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68>