

# Desarrollo de un robot paralelo 5R para la impresión en 3D

ELISEO DE JESÚS CORTÉS TORRES<sup>(1)</sup>, EFRAÍN ANDRÉS RODRÍGUEZ GASCA<sup>(2)</sup>  
CESAR AUGUSTO PEÑA CORTÉS<sup>(3)</sup>

(1) [eliseo.cortes@unipamplona.edu.co](mailto:eliseo.cortes@unipamplona.edu.co)

(2) [efrain.rodriguez@unipamplona.edu.co](mailto:efrain.rodriguez@unipamplona.edu.co)

Semillero de investigación de Automatización, Robótica y Control.  
Departamento de ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial  
Universidad de Pamplona.

(3) [cesarapc@unipamplona.edu.co](mailto:cesarapc@unipamplona.edu.co)

Grupo de investigación de Automatización y Control.  
Departamento de ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial  
Universidad de Pamplona.

# Desarrollo de un robot paralelo 5R para la impresión en 3D

---

## RESUMEN

---

*Palabras clave:*

***Impresión 3D; Robot Paralelo;  
Diseño Mecatrónico; Gestión de  
la Calidad; Prototipado***

**E**n este trabajo se realiza el diseño, construcción, control y simulación de un robot paralelo para la impresión en 3D. Se utilizó la metodología QFD con el objetivo de tener mayor acceso a las prioridades y necesidades de los usuarios finales en el desarrollo de la máquina, involucrándolo en el diseño CAD y construcción. Se desarrolló el análisis cinemático del mecanismo 5R mediante el análisis geométrico de mecanismos, el cual brindo el punto de partida para el desarrollo de simulación, el objetivo final de esta máquina radica en el hecho de poder desarrollar piezas volumétricas diseñadas previamente en un software CAD mediante la impresión en 3D.

## I. INTRODUCCIÓN

Basado en las necesidades de clientes se puede lograr una mejora continua para el desarrollo de productos, permitiendo priorizar las necesidades y requerimientos además de las posibles soluciones que se puedan dar a estas [1], [2], su implementación se ve mejor reflejada en la etapa de diseño al ser esta crítica en el desarrollo del proyecto [3], gracias a la metodología QFD (*Quality Function Development o Desarrollo de la Función de la Calidad*) se logró desarrollar un diseño bastante completo y funcional para este proyecto.

El diseño debe ser integrativo y flexible frente a los 4 campos de trabajo en mecatrónica (mecánica, electrónica, sistemas y control), haciendo de esta un área amigable en cualquier sector [4], adicionalmente se prevén requerimientos como repetitividad, precisión y un bajo costo de producción [5]. Nos permite así flexibilizar el acoplamiento del diseño mecánico, con la electrónica adquirida comercialmente, y el desarrollo de una interfaz de control, también se ve reflejado su bajo costo con el uso de materiales reciclados (Ejes, Motores PAP (paso a paso), Rodamientos, Retenedores, sensores, etc.) de máquinas dadas de baja, lo cual asegura un bajo costo en la producción. Teniendo definida el tipo de plataforma robótica que se desea diseñar teniendo en cuenta sus requerimientos, se desarrolla el análisis del problema cinemático directo e inverso que se presentan en este tipo de mecanismos paralelos, para estudios de área de trabajo y singularidades [6], [7], [8], [9] resolviendo así los problemas del modelamiento cinemático mediante el desarrollo del análisis geométrico de un mecanismo 5 barras, y teniendo en cuenta su área de trabajo y el uso de las diferentes configuraciones y longitudes en los eslabones.

Para el desarrollo de movimientos mediante la implementación de una etapa de control, primordialmente hay que hacer uso de una simulación para la detección de errores y posibles interferencias [10], [11], al igual se implementa una interfaz en java capaz de recrear lo movimientos de la maquina implementando el análisis cinemático desarrollado.

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente forma:

En la sección dos se presenta la descripción de las especificaciones y requerimientos de la máquina, en la sección tres se presentan la descripción del sistema que se pretende desarrollar, en la sección cuatro, se presenta el análisis cinemático del robot, en la sección cinco se presenta la fabricación de la máquina y por último se encuentran en la última sección los resultados y conclusiones del artículo.

## II. ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA

Con una población de 18 personas, adquirida de una encuesta desarrollada mediante la plataforma de Google Sheets (ver enlace en [12]), se obtuvo que los requerimientos más deseados para el desarrollo de esta máquina debían ser: que fuera precisa y exacta con un 95% de aceptación, mientras que la portabilidad solo tuvo un 33.3% de aceptación entre la población, siendo esta el más bajo porcentaje obtenido en la encuesta.

### A. Prioridades, Requerimientos y características del proyecto

Teniendo en cuenta la encuesta desarrollada se encuentra que entre los clientes las impresoras 3D deben tener cualidades como: maquina precisa y exacta, estética y acabado, la rapidez en producción, robustez, economía, adaptable a materiales comerciales, fabricación de diferentes y complejas piezas, fácil manejo, área de trabajo, portabilidad, fácil mantenimiento e interpretación de piezas en varios formatos.

Entre los requerimientos funcionales se encontraron elementos necesarios para llevar a cabo un proyecto mecatrónico como lo son: Diseño electrónico, diseño mecánico, actuadores, materiales, pintura, manufactura propia, control eficiente, tipo de comunicación, interfaz HMI y las dimensiones óptimas de la máquina y sus componentes, que a su vez hacen parte de este como solución a los requerimientos de los clientes, brindando la idea de justifi-

car el uso de ciertos componentes y materiales para el buen funcionamiento de la máquina.

*B. Análisis y pre-diseño*

Los resultados obtenidos a través de la implementación de la matriz de QFD, nos brindan la información pertinente para seleccionar en la etapa de pre-diseño algunos componentes que harán parte de todo el sistema.

TABLA I. IMPORTANCIA RELATIVA EN LOS REQUERIMIENTOS DE LOS CLIENTES		
<i>Importancia Relativa de Requerimientos en los Clientes</i>		
<i>Requerimientos del Cliente</i>	<i>Importancia Relativa</i>	<i>Ponderación (%)</i>
Maquina precisa y exacta	8.28	10
Estetica y acabado	7,5	9
Economia	6,62	8
Rapidez de producción	6,33	8
Adaptable a Materiales comerciales	7,12	9
Fabricación de cualquier pieza	7,31	9
Facil manejo	6,62	8
Area de trabajo	6,81	8
Robustez	6,73	8
Portabilidad	5,4	6
Facil Mantenimiento	7,11	9
Interpretacion de piezas en distintos formatos	7,51	9

Requerimientos como máquina precisa y exacta, estética y acabado, interpretación de piezas en distintos formatos, adaptable a materiales comerciales y la fabricación de piezas complejas tuvieron un alto porcentaje de aceptación (ver TABLA I), lo cual permitió a los diseñadores contar con la selección de algunas soluciones conocidas como requerimientos funcionales, visibles en la TABLA II, estos dan solución a cada uno de los requerimientos, pretendiendo de manera correcta llevar cada proceso satisfactoriamente, de lo cual se desprende el hecho que para que una maquina sea precisa y exacta se necesita robustez en su diseño mecánico, por lo cual el

uso de motores PAP, de materiales metálicos como el aluminio y acero, el uso de rodamientos para cada articulación conceden un buen desarrollo en el diseño final.

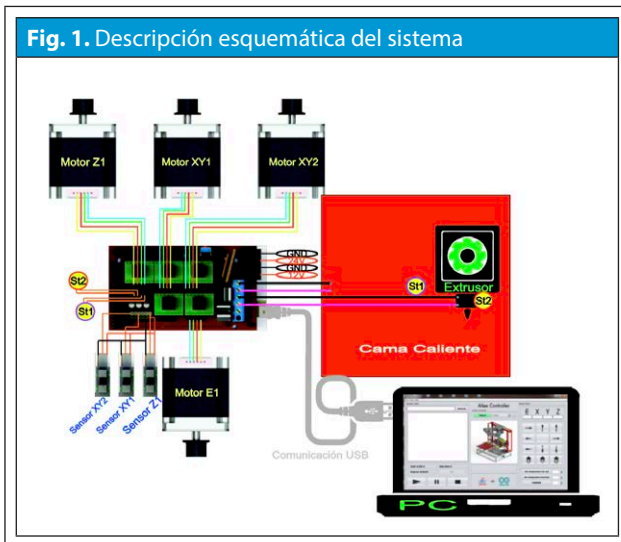
TABLA II. IMPORTANCIA RELATIVA EN LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES		
<i>Importancia Relativa de los Requerimientos Funcionales</i>		
<i>Requerimientos Funcionales</i>	<i>Importancia Relativa</i>	<i>Ponderación (%)</i>
Diseño Electrónico	253	8
Diseño Mecánico	645,3	19
Actuadores	208,7	6
Materiales	449,7	13
Pintura	88,94	3
Manufactura Propia	362,5	10
Software	475,9	14
Control Eficiente	309,4	9
Comunicación	178	5
Interfaz HMI	152,6	5
Dimensiones Optimas	244,6	7

Por otra parte el desarrollo de una interfaz HMI en conjunto de una buena comunicación, un firmware y un control eficiente permitirán interpretar el código G, su manejo y acelerar o desacelerar el avance para la producción optimizada de este.

**III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.**

Para desarrollar un sistema capaz de hacer tareas de impresión 3D, en esta descripción se abarcara la etapa de diseño de manera esquemática.

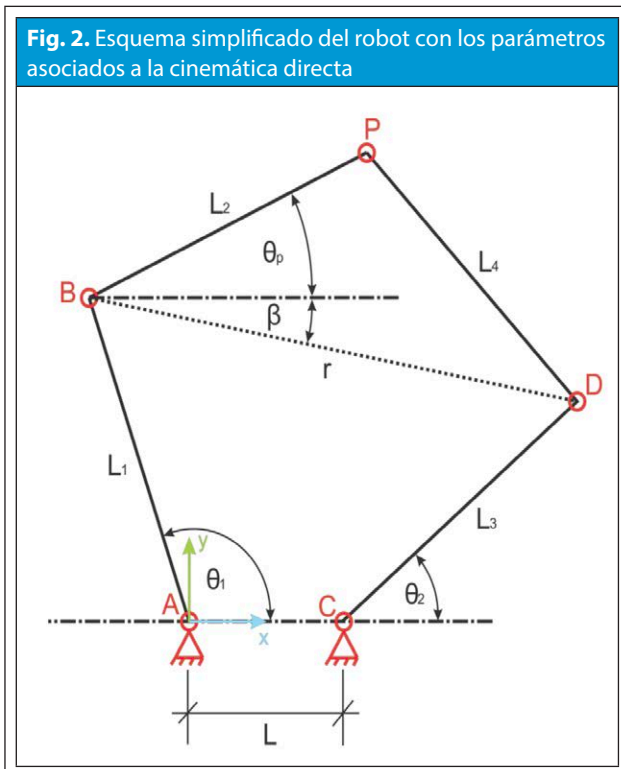
El diseño de este esquemático se desarrolló con base a las tecnologías OpenSource y OpenHardware, la cual nos permiten expandir el proceso de implementación en la máquina, su controlador Arduino Mega2560 conectado mediante un cable USB a una interfaz desarrollada en JAVA, y un firmware desarrollado en Arduino y enlazado a una PC, este a su vez es capaz de convertir las ordenes gracias a la extensión o escudo Ramps 1.4 que comercialmente es asequible y muy versátil.



El uso de electrónica comercial, se ve reflejada en la implementación de la máquina, lo cual acelera el proceso de diseño y construcción de la impresora 3D, es así como se obtienen los pasos a seguir en el proyecto.

#### IV. MODELADO CINEMÁTICO DEL ROBOT

##### A. Cinemática Directa.



La cinemática directa, permite conocer la posición y orientación del efector final a partir de los parámetros articulares y dimensionales del robot [13].

En la figura 2, se tiene la representación gráfica del mecanismo estudiado, se compone de cinco eslabones ( $L_1, L_2, L_3$  y  $L_4$ ) unidos mediante articulaciones de tipo rotacional ubicadas en los puntos A, B, C, D y P. El objetivo es relacionar las coordenadas del punto P, con respecto al sistema coordenado de referencia ubicado en el punto A, dados los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ .

El análisis se hace de la siguiente forma:

##### 1) Ubicación del punto A

En este punto articular, se encuentra situado el sistema coordenado de referencia, por lo que las componentes  $A_x$  y  $A_y$ , se igualan a cero.

$$A_x = 0 \quad (1)$$

$$A_y = 0 \quad (2)$$

##### 2) Ubicación del punto B

$$B_x = L_1 \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$B_y = L_1 \sin \theta_1 \quad (4)$$

##### 3) Ubicación del punto C

$$C_x = L \quad (5)$$

$$C_y = 0 \quad (6)$$

##### 4) Ubicación del punto D

$$D_x = L_3 \cos \theta_2 + L \quad (7)$$

$$D_y = L_3 \sin \theta_2 \quad (8)$$

Para facilitar el análisis, se supone una barra imaginaria  $r$  mostrada en la figura 2, cuya longitud está dada por:

$$r = \sqrt{(L - L_1 \cos \theta_1 + L_3 \cos \theta_2)^2 + (L_1 \sin \theta_1 - L_3 \sin \theta_2)^2} \quad (9)$$

El ángulo de orientación de esta barra, se toma con respecto a una línea horizontal y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\beta = \text{atan2}(L_1 \cos \theta_1 - L_3 \sin \theta_2, L - L_1 \cos \theta_1 + L_3 \cos \theta_2) \quad (10)$$

Si se observa el triángulo formado por las barras  $L_2$ ,  $L_4$  y  $r$ , es preciso plantear la relación que permita hallar el valor del ángulo  $\theta_p$  mediante el teorema del coseno:

$$\theta_p = \beta + \cos^{-1} \left( \frac{r^2 + L_2^2 - L_4^2}{2L_2 r} \right) \quad (11)$$

5) Ubicación del punto P

Con la obtención del ángulo  $\theta_p$  pueden calcularse las componentes del punto P, que representan la posición del efector final del robot así:

$$P_x = B_x + L_2 \cos \theta_p \quad (12)$$

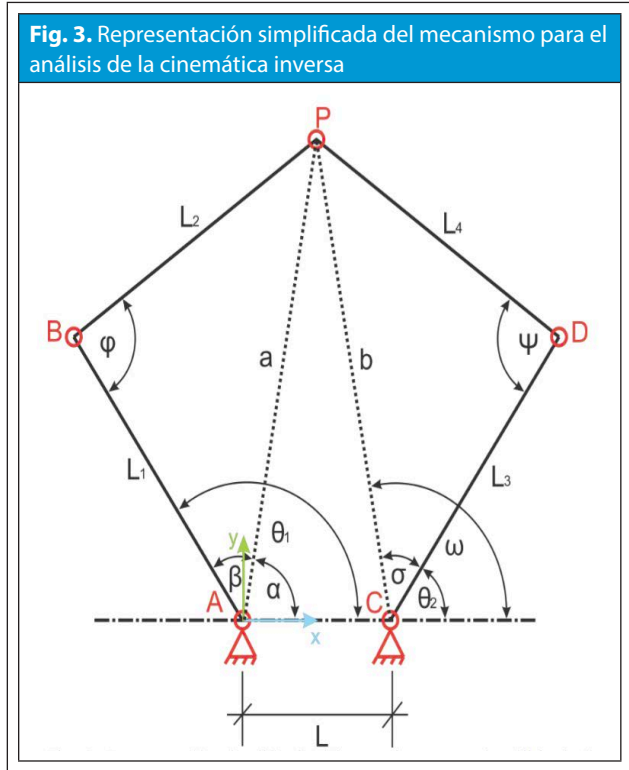
$$P_y = B_y + L_2 \sin \theta_p \quad (13)$$

B. Cinemática inversa

Descrito por Barrientos, la cinemática inversa permite obtener las posiciones angulares que debe adoptar cada articulación del robot, para lograr posicionar y orientar el efector final en una determinada localización espacial [13].

Para la resolución de la cinemática inversa en este mecanismo de 5 barras (ver figura 3), se requieren como parámetros de entrada las coordenadas (x, y) del punto P, así como las variables CODO1 y CODO2 que permiten seleccionar la configuración del robot.

Con base en la figura 3, se pueden tener las longitudes de las barras imaginarias a y b, además de los ángulos de orientación  $\alpha$  (alfa) y  $\omega$  (omega), mediante las ecuaciones (14), (15), (16) y (17), extraídas de los triángulos rectos formados por los puntos A, C y P.



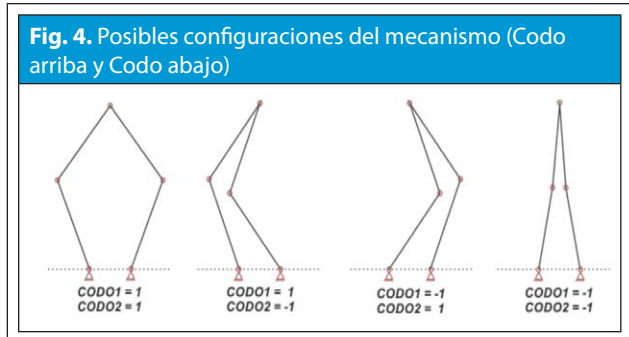
$$a = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (14)$$

$$b = \sqrt{(l-x)^2 + y^2} \quad (15)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(y, x) \quad (16)$$

$$\omega = \pi - \tan^{-1}(y, l-x) \quad (17)$$

A continuación, se consideran las posibles configuraciones que puede adoptar el mecanismo de acuerdo al valor que toman las variables CODO1 y CODO2 (1 codo arriba, -1 codo abajo). En la figura 4 se pueden ver las cuatro formas posibles de alcanzar un mismo punto por parte del mecanismo.



Establecer el valor de los ángulos  $\varphi(\text{phi})$  y  $\psi(\text{psi})$  es el paso a seguir con el uso del teorema del coseno, plantea la siguiente relación:

$$\cos(\varphi) = \frac{L_1^2 + L_2^2 - a^2}{2L_1L_2} \quad (18)$$

A partir de las propiedades del seno y el coseno se tiene:

$$\sin(\varphi) = \text{CODO1} \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} \quad (19)$$

El arco tangente de las componentes rectangulares permite calcular el ángulo  $\varphi(\text{phi})$ :

$$\varphi = \text{atan2}(\sin(\varphi), \cos(\varphi)) \quad (20)$$

Para hallar  $\psi(\text{psi})$ , se realiza el mismo procedimiento que para  $\varphi(\text{phi})$ , de lo cual se obtienen las siguientes relaciones:

$$\cos(\psi) = \frac{L_3^2 + L_4^2 - b^2}{2L_3L_4} \quad (21)$$

$$\sin(\psi) = \text{CODO2} \sqrt{1 - \cos(\psi)^2} \quad (22)$$

$$\psi = \text{atan2}(\sin(\psi), \cos(\psi)) \quad (23)$$

La orientación de las barras imaginarias a y b, está dada por:

$$\beta = \text{atan2}(L_2 \sin(\pi - \varphi), L_1 + L_2 \cos(\pi - \varphi)) \quad (24)$$

$$\sigma = \text{atan2}(L_4 \sin(\pi - \psi), L_3 + L_4 \cos(\pi - \psi)) \quad (25)$$

Finalmente se establecen las posiciones angulares de L1 y L2 respecto a los puntos articulares A y C. en estos puntos se suponen ubicados los actuadores que generan el movimiento del mecanismo, para que el punto P alcance la posición establecida por las coordenadas x e y.

Las posiciones angulares  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , están dadas por:

$$\theta_1 = \alpha + \beta \quad (26)$$

$$\theta_2 = \omega - \sigma \quad (27)$$

## V. FABRICACIÓN

En esta etapa se pretende llevar a la realidad el diseño de la máquina mediante el uso de herramientas computacionales para el mecanizado

(CAM) y máquinas de control numérico computarizado (CNC), además de técnicas de manufactura existentes en el departamento de ingenierías mecánica, mecatrónica e industrial de la Universidad de Pamplona, así se constituye su fabricación en varias etapas y se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

### 1) Materiales y piezas: compradas y reciclados.

Durante el diseño de esta, se dispuso de materiales y piezas recicladas de máquinas dadas de baja como (Ejes, Motores PAP, Rodamientos, Retenedores, sensores, etc.), que tienen el detalle de economizar de alguna manera los costos de los materiales para desarrollar la impresora 3D según los requerimientos del QFD.

Su fácil mantenimiento permite que la lubricación de algunas de estas partes y el uso de otras piezas que no generan desgastes o esfuerzos en los trabajos desarrollados en las máquinas anteriores permiten tener un control efectivo de los elementos reciclados.

Por otra parte los materiales comprados pretenden darle una base rígida a la máquina proporcionando robustez y rigidez a la estructura que se desea construir.

### 2) Actuadores.

Los motores PAP que fueron tenidos en cuenta para este proyecto fueron reciclados, con base en su diseño se desarrollaron muchas de las partes de la máquina, lo cual tiene como objetivo permitir un fácil desarme y mantenimiento para el cambio ante un daño que surja eventualmente.

### 3) Extrusor, cama caliente y electrónica

Estos elementos fueron comprados, lo cual brinda ergonomía a la hora de diseñar el resto de las piezas de la máquina, estos elementos conocidos por sus buenas prestaciones en los proyectos Reprap (Máquinas Auto replicables) tipo OpenSource y OpenHardware, han hecho de este proyecto, un buen inicio para desarrollar máquinas a bajo costo y además de esto generando un estigma de manera

social, brindando el servicio a la comunidad estudiantil.

## VI. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en cada etapa brindan una sinergia entre los elementos que componen la ingeniería mecatrónica y a fines, teniendo estos resultados de la siguiente manera.

### 1) Diseño y arquitectura

En la figura 5 se muestra el diseño CAD realizado, este fue concebido mediante la implementación de un software de diseño siguiendo los lineamientos, requerimientos, especificaciones y características establecidas en la metodología QFD.

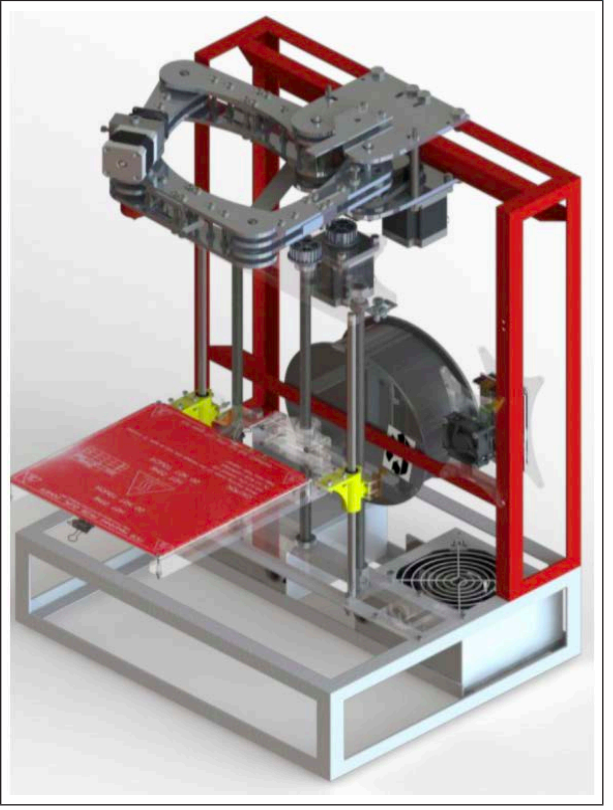
Su diseño estructurado permite que su mantenimiento y portabilidad sea lo más versátil posible, es así como se concibe la idea, implementando materiales comerciales y asequibles en su diseño, para que se pueda llevar a cabo la construcción y ensamblajes de esta en la vida real.

El diseño de la máquina, fue desarrollado por completo teniendo en cuenta la electrónica, actuadores y accesorios encontrados en el mercado (Arduino, *Shield's* para Arduino, Motores PAP, Extrusor y Cama caliente (HeatBed)), el mecanismo 5 barras, el mecanismo husillo-tuerca y la estructura en general fueron ideas del grupo de trabajo desarrollador de este proyecto.

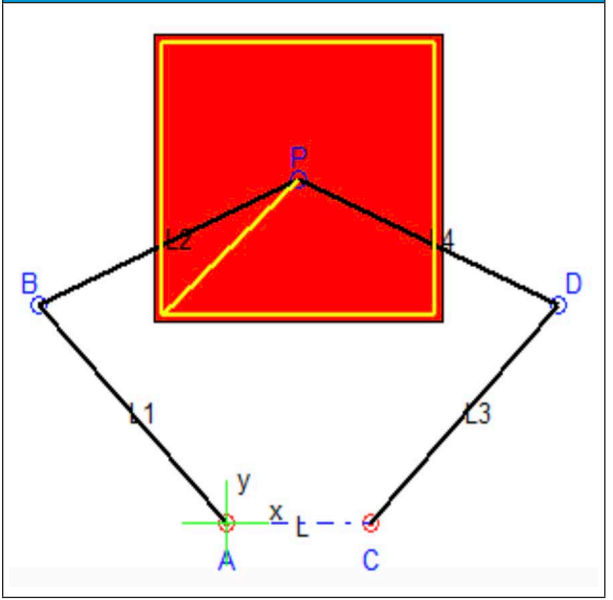
### 2) Simulación

Las simulaciones manejadas se desarrollan gracias a la implementación de la cinemática inversa y directa en un software de análisis computacional, esta permitió utilizar varios interpoladores tipo Spline para el buen desarrollo de las trayectorias y así alcanzar una buena precisión en el trabajo para la que ha sido diseñada.

**Fig. 5.** Diseño CAD del robot paralelo con su 3er grado de libertad para la impresión 3D

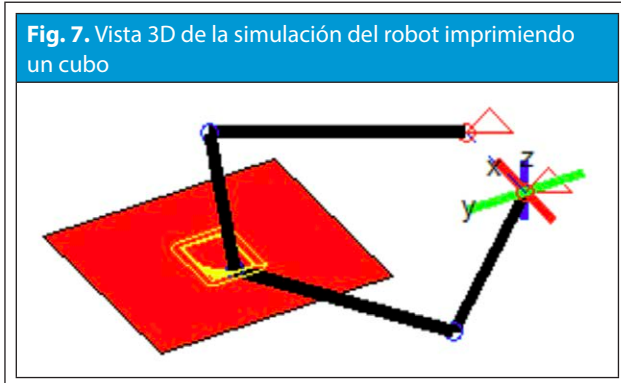


**Fig. 6.** Simulación del Robot enmarcando el área de trabajo





La figura 6 muestra la implementación de un Spline cubico el cual se utiliza para enmarcar el área de trabajo (línea amarilla) que la maquina puede abarcar, además de esto nos permite ver el desarrollo del mecanismo al realizar líneas rectas y líneas o con un ángulo de 45°.



**Fig. 7.** Vista 3D de la simulación del robot imprimiendo un cubo

En la figura 7, el robot visto isométricamente, permite observar el desarrollo de un cubo cargado mediante un intérprete de código g en la simulación.

3) Interfaz gráfica y firmware.



**Fig. 8.** Interfaz de control "Atlas Controller" desarrollada en Java

Para el desarrollo de una interfaz (ver figura 8) y los archivos del firmware (ver figura 9) tipo Open-Source se utilizaron softwares de acceso libre (Java, Arduino), esto ha permitido que las pruebas con actuadores y sensores se haga de forma fácil y eficaz, además el hecho de poder conectar la Arduino mediante esta interfaz, y poder seleccionar velocidades de envío y recepción de datos, cargar y editar códigos g generados mediante el software Slic3r, movi-

miento manual y automático del robot y un manual de usuario de la maquina aun en desarrollo.

**Fig. 9.** Archivos pertenecientes al firmware del robot

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Atlas_Driver	21/05/2015 3:56 p...	Archivo INO	20 KB
configuration	20/05/2015 4:05 p...	Archivo H	4 KB
kinematic	18/05/2015 10:55 ...	Archivo CPP	2 KB
kinematic	20/05/2015 4:51 a...	Archivo H	1 KB
motion	21/05/2015 3:56 p...	Archivo CPP	8 KB
motion	20/05/2015 4:51 a...	Archivo H	1 KB
temperature	18/05/2015 2:44 a...	Archivo CPP	2 KB
temperature	20/05/2015 1:00 a...	Archivo H	1 KB

4) Fabricación



**Fig. 10.** Fabricación de eslabones del mecanismo

La fabricación y ensamblaje de algunas partes del robot se puede observar en las figuras 10 y 11 respectivamente.

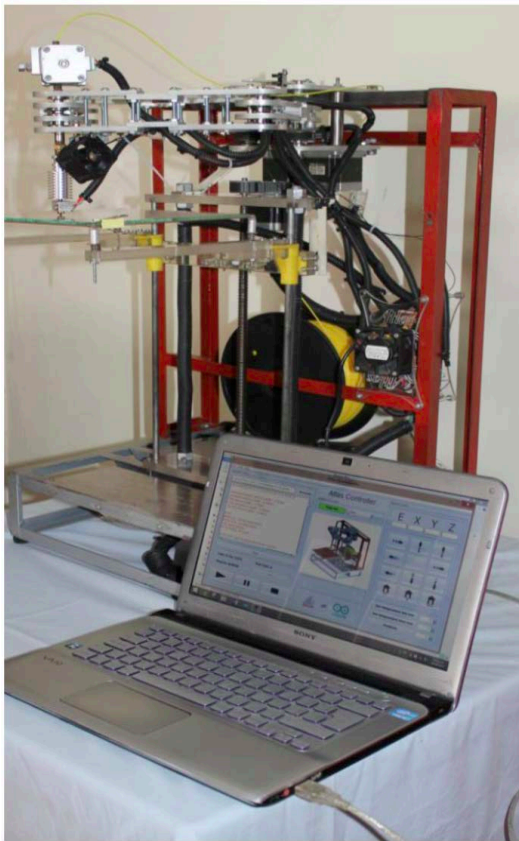


**Fig. 11.** Ensamble mecanismo 5 barras

Este proceso se llevó a cabo mediante el uso de máquinas de control numérico computarizado (CNC), utilizando como base el diseño ya establecido, y que como se dijo, acoplado a los procesos de mecanizado para que su fabricación sea eficiente. Su ensamblaje se hizo estructuradamente y utilizando los elementos reciclados y comprados para su fabricación.

### 5) Ensamble final

Fig. 12. Ensamble final de la máquina



En la figura 12 se puede observar el ensamblaje final del robot junto a su interfaz AtlasGCode\_Sender conectados, su ensamblaje se hizo con base al diseño hecho digitalmente, su versión final cuenta con la optimización de los eslabones para que abarque sus extensiones máximas y así poder abarcar toda el área de trabajo.

En la figura 12, se puede observar el uso de la electrónica de potencia, fuentes de poder, esto de-

bido a que la necesidad de torque se utiliza 24V en vez de 12V, el eje Z, el cableado de la máquina, además de una vista lateral del mecanismo 5 barras.

La implementación de electrónica comercial de bajo costo ayudo a que las pruebas que se realizaran fueran de manera fácil y versátil, teniendo los siguientes resultados.

### 6) Piezas obtenidas

Durante las pruebas realizadas, se han mejorado los parámetros de impresión tanto el firmware, como en software CAM Slic3r y se han obtenido las siguientes piezas impresas en 3D (ver figura 13 y 14).

Fig. 13. Atlas 3D Printer imprimiendo una pieza



Fig. 14. Algunos diseños impresos en la máquina



## VII. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología ha dado buenos resultados, ya que permitió desarrollar una ruta crítica de diseño para el desarrollo de esta má-

quina, implementando la idea de desarrollarla teniendo en cuenta los requerimientos de los clientes encuestados.

El análisis cinemático del mecanismo, ha permitido poder comprender algunas de las limitaciones del robot, por lo cual se ha optimizado el robot para que abarque toda el área de trabajo sin alterar el diseño ya desarrollado optimizando la longitud de sus eslabones.

La impresión de la maquina ha sido buena, mejorando problemas de manejo por software se ha llevado a que la maquina cada vez haga las piezas volumétricas en mejor calidad y mejor acabado.

Entre los resultados más relevantes, el desarrollo de una interfaz de control propia ha servido para desarrollar pruebas en motores y sensores, pudiendo observar el buen desempeño de esto en la implementación del robot, otro avance bastante importante es el desarrollo de algunas piezas diseñadas pertenecientes al mecanismo de 5 barras, cerciorándose de su buen funcionamiento haciendo alusión a su buen diseño.

## REFERENCIAS

- [1] D. L. Goetsch, S. Davis, E. Merrill, and S. Uselac, ( Quality Function Deployment ), 7th ed. Prentice Hall, 1993.
- [2] Y. Y. Huang and K. H. Low, "Comprehensive planning of robotic therapy and assessment of task-oriented functions via improved QFD applicable to hand rehabilitation," 2010 IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng. CASE 2010, pp. 252–257, 2010.
- [3] S. Pertuz and C. Peña, "A Robotic System capable of serving drinks to its user," pp. 3–7, 2014.
- [4] M. a. Jarrah, "Teaching mechatronics design course for engineers," 2005 IEEE Work. Adv. Robot. its Soc. Impacts, vol. 2005, pp. 97– 102, 2005.
- [5] A. Burisch, S. Soetebier, and J. Wrege, "Design of a parallel hybrid micro-scara robot for high precision assembly," *Mechatronics Robot.*, vol. 4, pp. 1370–1380, 2004.
- [6] X. J. Liu, J. Wang, and G. Pritschow, "Kinematics, singularity and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms," *Mech. Mach. Theory*, vol. 41, no. 2, pp. 145–169, 2006.
- [7] J. J. Cervantes-Sánchez, J. C. Hernández-Rodríguez, and J. G. Rendón-Sánchez, "On the workspace, assembly configurations and singularity curves of the RRRRR-type planar manipulator," *Mech. Mach. Theory*, vol. 35, no. 8, pp. 1117–1139, 2000.
- [8] J. Wu, T. Li, X. Liu, and L. Wang, "Optimal Kinematic Design of a 2-DOF Planar Parallel Manipulator," *Tsinghua Sci. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 269–275, 2007.
- [9] N. Ramdani, M. Gouttefarde, F. Pierrot, and J. P. Merlet, "First [12] results on the design of high speed parallel robots in presence of uncertainty," 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS, pp. 2410–2415, 2008.
- [10] X. Jiayin and L. Yi, "Computer simulation for a real-time process of [13] machining on a 3D free surface by using a spatial 3-UPRR parallel robot," *Proc. 2008 Int. Conf. Comput. Electr. Eng. ICCEE 2008*, pp. 470–474, 2008.
- [11] M. Asgari, M. Alinaghizadeh Ardestani, and M. Asgari, "Dynamics and control of a novel 3-DoF spatial parallel robot," *Int. Conf. Robot. Mechatronics, ICROm 2013*, pp. 183–188, 2013.
- [12] E. Cortés and E. Rodríguez, "Impresora 3D: Encuesta requerimientos.," Google Sheets, 2014. [Online]. Available: docs.google.com/forms/d/1od2P3JXbbdZPtJSw70wcegcBNHbUk ef-a5UZ1OMFdY/viewform.
- [13] R. Barrientos, Antonio, Peñin, L., Balaguer, C., Aracil, *Fundamentos de Robotica*. Madrid: McGraw Hill, 1997.