

# CÁLCULO DIMENSIONAL ÓPTIMO DE UNA PLATAFORMA PARALELA TIPO STEWART-GOUGH PARA APLICACIONES PEDAGÓGICAS USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

*Dimensional calculation optimal platform Stewart-Gough type parallel to pedagogical applications using genetic algorithms*

Fecha de recibo del artículo: Julio de 2011 - Fecha de aceptación: Septiembre de 2011

César Augusto Peña

Universidad de Pamplona - Norte de Santander, Colombia, cesarapc@unipamplona.edu.co

Eugenio Yime Rodríguez

Universidad Tecnológica de Bolívar - Cartagena, Colombia, eyime@unitecnologica.edu.co

Ilka Banfield

Universidad Tecnológica de Panamá - Santiago, Panamá, ilka.banfield@utp.ac.pa

## RESUMEN

En este artículo se propone el diseño óptimo de una plataforma paralela tipo Stewart-Gough que cubre un espacio de trabajo esférico. El cálculo de las dimensiones del robot se realizó por medio de técnicas de algoritmos genéticos. Ilustra los cálculos de cinemática inversa y del espacio de trabajo. Esta plataforma está diseñada para aplicaciones pedagógicas en las áreas de teleoperación, control, visión y automatización usando robótica paralela. La plataforma experimental puede ser operada remotamente por usuarios de diversas universidades utilizando un lenguaje de programación bastante intuitivo y común.

## Palabras clave

Robótica, teleoperación, control, algoritmos genéticos y optimización.

## ABSTRACT

This paper proposes an optimal design of a parallel platform type Stewart-Gough that covers a spherical workspace. The dimension of the parallel robot was obtained using techniques of genetic algorithms. It illustrates the calculus of the inverse kinematics and the workspace. The platform was designed for educational applications such as: teleoperation, control, vision and automations oriented to parallel robotics. Users of different universities can operated remotely the experimental platform using a programming language rather intuitive and common.

## Keywords

Robotics, teleoperation, control, genetic algorithms and optimization.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la actividad de investigación en el campo de los robots ha ganado un impulso considerable, y con su creciente éxito no sólo se recibe atención en la comunidad científica, sino también en la industria. La robótica constituye un mercado emergente, claro, para una gran variedad de posibilidades de aplicación en una amplia gama que abarca robots de servicio, entretenimiento, médicos, aéreos, asistenciales, agrícolas, búsqueda y rescate, para la construcción, así como el logro de las tareas remotas en ambientes peligrosos.

Por motivo de este desarrollo, las universidades enseñan un número cada vez mayor de cursos de robótica y los investigadores llevan a cabo proyectos de tesis doctoral en esta área. Es un tema interdisciplinario que involucra diversas áreas de ingeniería y un componente clave es la necesidad de integrar estas disciplinas con el fin de construir sistemas. Por lo tanto, ofrece una excelente base para la enseñanza de una serie de disciplinas de ingeniería y su integración en los sistemas.

Los robots también proporcionan una excelente plataforma para la demostración de problemas de ingeniería básica en el esfuerzo educativo. Ejercicios prácticos de proyectos de los estudiantes ayudan a desarrollar habilidades como la creatividad, el trabajo en equipo, diseño y resolución de problemas. Una gran ventaja del uso de robots como herramientas de experiencias y proyectos es que los conceptos abstractos se pueden convertir en problemas del mundo real y soluciones. La motivación de los estudiantes mejora en la medida en que los conceptos dejan de ser abstractos [1]. Han sido reportadas algunas experiencias en cursos que utilizan robots; por ejemplo: ingeniería de software [2], algoritmos genéticos, inteligencia artificial [3], estructuras de datos [4]. Con la utilización de robots como apoyo en la docencia, se puede progresar en los conocimientos teóricos y conocimientos prácticos. Ahlgren [5] identificó 17 campos en los que se podía progresar de manera considerable mientras trabajaba en un concurso de robots, entre los que destacó: física, matemáticas, diseño de sistemas y el trabajo en equipo. Los robots son muy populares y estimulantes para los estudiantes universitarios y también se puede utilizar como un factor de motivación para atraer a estudiantes de la escuela para tomar cursos de ingeniería.

En ese orden, para poder utilizar los robots en la enseñanza, proyectos prácticos y de investigación, las universidades necesitan plataformas que sean flexibles y modulares, pero robustas y potentes, que puedan ser fácilmente adaptadas a las necesidades individuales.

Comparado con el robot de estructura serial, el relativamente nuevo tipo de robot paralelo, posee importantes ventajas, tales como: rigidez estructural, elevada relación de carga/peso y mayor precisión. Son estas características las que han promovido la utilización de robots paralelos en la industria aeroespacial, en radares direccionales y máquinas herramientas de gran velocidad [6]. Muchos estudiosos se han sentido atraídos por la investigación y desarrollo de los robots paralelos debido a su excelente cinemática y desenvolvimiento dinámico y a su elevado potencial como aplicación industrial.

A través del estado de la investigación de los robots paralelos se puede inferir que, con el elevado valor científico adquirido y el gran potencial industrial que representa, actualmente es objetivo de investigación (en el área de ingeniería mecánica) resolver sus dificultades. Dentro de este entorno, los conceptos de robótica pueden ser practicados. Los estudiantes pueden desarrollar investigaciones científicas con los docentes, desarrollando varios componentes y coordinando el conjunto de las partes del sistema robótico. Y luego, con el prototipo en funcionamiento, absorbiendo y aportando conocimiento en este campo de la investigación.

En este artículo se propone el diseño dimensional de una plataforma Stewart-Gough (*Stewart-Gough platform* - SG) que puede ser considerada, de cierta manera, como una de las formas generales de un robot paralelo con seis grados de libertad. El robot SG (Figura 1) consiste en una base y plataforma móvil unidas por seis piernas, las cuales se componen a su vez por actuador lineal que está unido a la base por una junta universal y a la plataforma móvil por otra junta esférica. El diseño original de la SG fue empleado como simulador de vuelo [7], aunque también fue propuesto como un mecanismo diseñado por Gough [8] para pruebas a los neumáticos de ruedas.

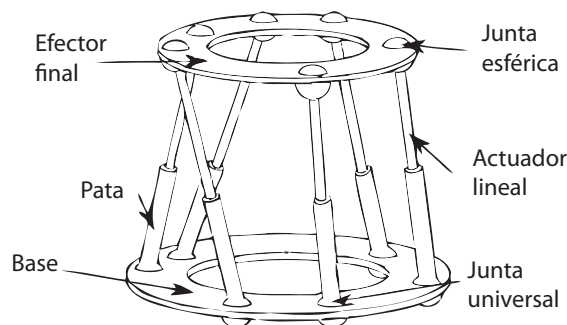


Figura1. Ejemplo típico de un robot Stewart-Gough

## DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA

El avance logrado en las telecomunicaciones y la tendencia hacia la globalización en los diferentes ámbitos, incluyendo los sectores educativos, está impulsando el desarrollo de propuestas educativas que permiten a los estudiantes realizar prácticas o experimentos haciendo uso de laboratorios especializados remotamente, los cuales pueden ubicarse en diferentes sedes de su propia universidad o incluso en universidades ubicadas en otros países. Esto genera un aumento en el aprovechamiento de los recur-

sos físicos de las universidades, a la vez que aumenta la calidad de la enseñanza, permitiendo a los estudiantes que no cuentan con dichos laboratorios realizar prácticas experimentales de alto nivel.

Uno de los objetivos de la plataforma propuesta es brindar la posibilidad a estudiantes de diversas universidades de adquirir o afianzar sus conocimientos en las áreas de: dinámica, control, tratamiento de imágenes, teleoperación y automatización, orientadas hacia la robótica paralela.

En la Figura 2 se puede apreciar el diagrama esquemático de la plataforma paralela. En esta se pueden distinguir claramente dos zonas: La zona local, donde se ubican los usuarios, y la zona remota, donde está ubicado el robot paralelo.

Con el fin de ampliar el margen de cobertura o uso de la plataforma, esta fue diseñada para que el software requerido en la zona local fuese Matlab®. Este software es muy común en las universidades y permitirá que un gran número de estudiantes haga uso de la plataforma remota, incluso desde sus propios hogares. En la zona local se sitúan los dispositivos de entrada los cuales pueden ser palancas de mando (de uso muy común) o si se quiere dispositivos con reflexión de fuerzas, en caso de que se desee realizar prácticas avanzadas en teleoperación. En esta zona también se sitúa la interfaz gráfica

con el fin de que los usuarios puedan observar el comportamiento del dispositivo remoto y la información proveniente de los sensores.

La zona remota consta del robot paralelo, el cual tiene como entrada seis actuadores lineales. Estos se operan por medio de un módulo de control a bajo nivel. En esta zona también se ubica un módulo denominado sistemas de protección, que se encarga de proteger el robot ante posibles problemas que puedan ocurrir tales como colisiones, evasión de singularidades o puntos muertos e inestabilidades que puedan surgir al probar nuevos sistemas de control. Este módulo es muy importante debido a que la plataforma está principalmente diseñada para que los estudiantes realicen sus prácticas, y como pueden cometer errores, la plataforma debe realizar el correcto tratamiento de los mismos. En esta zona se alojan todos los sensores que

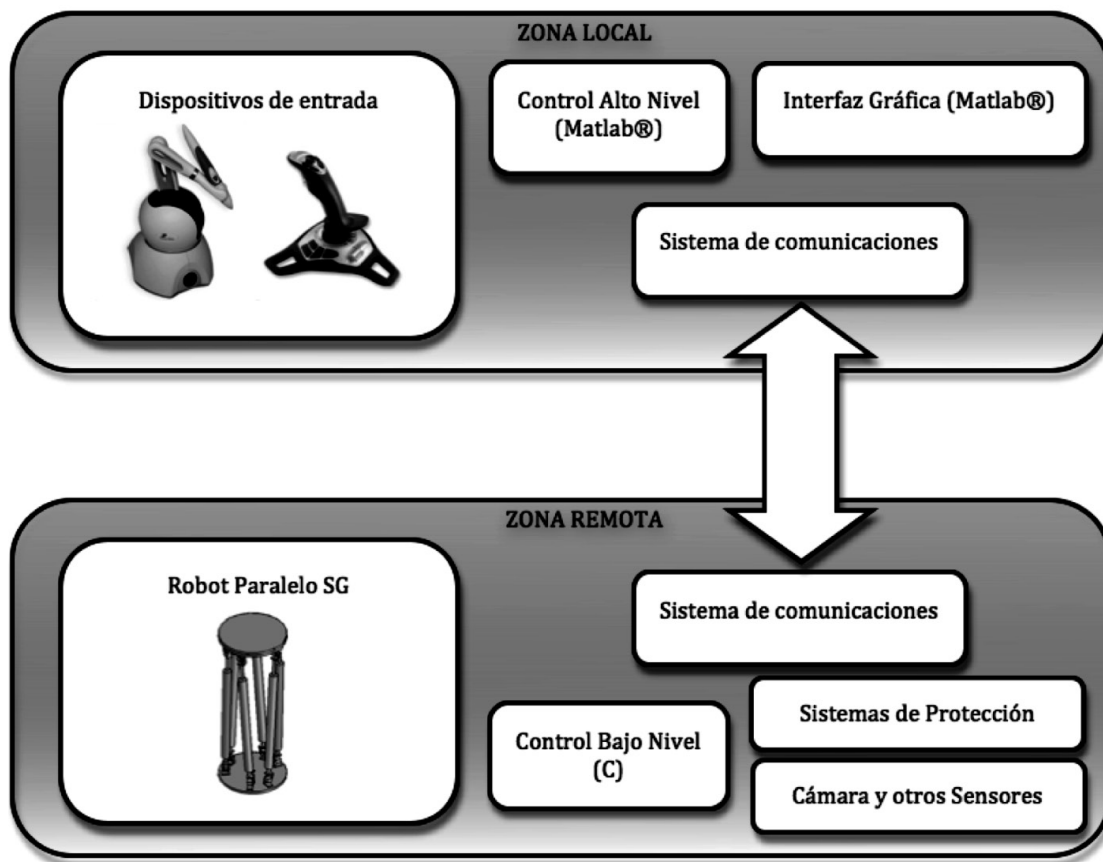


Figura 2. Diagrama esquemático de la plataforma

capturan la información del robot y su entorno con el fin de enviarla hacia la zona local y cerrar los buques del control de alto nivel.

En las dos zonas se encuentra un módulo de comunicaciones, que permite enviar y recibir entre el robot y el dispositivo de entrada que opera el usuario. Este módulo de comunicaciones está implementado usando el protocolo UDP (*User Datagram Protocol*). El protocolo permite la comunicación no solamente entre Matlab y C, sino entre diversos lenguajes de programación, razón por la cual el robot puede ser teleoperado desde una gran variedad de programas.

La idea principal de este trabajo es montar todos los elementos de la zona remota en el laboratorio de robótica de la Universidad de Pamplona, y por medio de un sistema de gestión de usuarios dar acceso a estudiantes de diversas universidades para que realicen sus prácticas vía Internet. Los estudiantes tendrán dos modos de operación: 1) Por el modo de simulación, donde el estudiante desde Simulink implementa los esquemas de control; y 2) Por medio de un bloque suministrado para este entorno realizando las pruebas sobre un robot virtual. Una vez el estudiante se cerciora del funcionamiento de sus esquemas de control, reemplaza el bloque del robot virtual por el bloque del robot real, el cual se encarga de la comunicación y operación del robot real, corroborando sus pruebas de manera experimental.

### CINEMÁTICA INVERSA

En la Figura 3 se ilustran los vectores utilizados para realizar el análisis cinemático inverso del robot SG. Se empieza por incluir dos sistemas de referencia tanto en la base,  $X_p, Y_p, Z_p$  como en el efector final  $X, Y, Z$ . Los sistemas de referencia sirven para describir tanto la orientación, matriz de rotación  $R_p$ , como la posición, vector  $r_p$ , del efector final respecto a la base. Para la ubicación de cada pata se utiliza el vector  $r_j$ , el cual describe la posición de la junta universal de la  $j$ -ésima pata en la base, este vector hará un ángulo  $\alpha_j$

con el eje  $X$ . Adicionalmente, en la base de cada pata se ubica un sistema de referencia local que describe las orientaciones y movimientos que ocurren en las juntas universales y en la junta traslacional. Los vectores unitarios  $u_{2,i}$  y  $u_{4,i}$  describen las rotaciones alrededor de la junta universal, y el vector  $u_{3,i}$  describe el movimiento de traslación a lo largo de la junta prismática. Por último, en el efector final se utiliza el vector  $r_i$  y el ángulo  $\alpha_i$  para describir la ubicación de la pata.

Se puede crear, a partir de estas definiciones de vectores, la siguiente ecuación de lazo vectorial.

$$r_j + d_i = r_p + r_i \tag{1}$$

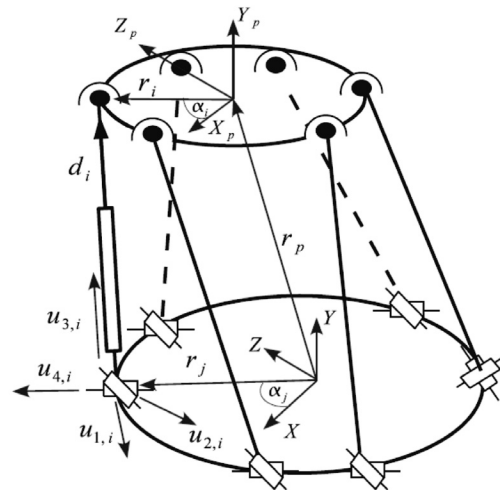


Figura 3. Nomenclatura utilizada para obtener la cinemática inversa del robot Stewart-Gough

Despejando para el actuador prismático e incluyendo la matriz de rotación del efector final se tiene:

$$d_i = r_p + R_p r_i^p - r_j \tag{2}$$

La anterior es la ecuación empleada para la cinemática inversa de posición del robot Stewart-Gough. En este caso, para una posición y orientación establecida del efector final, es decir  $r_p$  y  $R_p$  conocidos, se calcula las longitudes de los actuadores lineales,  $d_i$ , considerando que los vectores  $r_i^p$  y  $r_j$  son constantes.

Para el caso de velocidad se procede a derivar la ecuación anterior, con lo cual se tiene para cada pata lo siguiente.

$$v_i = v_p + R_p \omega_p^p \times r_i^p = v_p - R_p r_i^p \times \omega_p^p \quad (3)$$

En este caso se tienen seis ecuaciones, una por cada pata, las cuales se pueden agrupar para formar una ecuación vectorial.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -R_p r_1^p \times \\ \vdots & \vdots \\ I & -R_p r_6^p \times \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_p^p \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde se ha definido el operador matricial del producto cruz.

$$a \times = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Usando una notación más simplificada, la ecuación (4) puede expresarse como:

$$V = J \begin{bmatrix} v_p \\ \omega_p^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde se define J como el jacobiano inverso del robot SG y se utiliza para calcular las velocidades de los actuadores lineales, conociendo la velocidad lineal y angular del efector final.

## VERIFICACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO CON VARIAS ORIENTACIONES

Los robots paralelos son caracterizados por ser robots de grandes prestaciones en cuanto a su

velocidad, precisión, capacidad de carga versus peso, entre otros. Sin embargo, tienen una gran desventaja comparados con los robots seriales y es su reducido espacio de trabajo. Por esta razón, es muy importante diseñar los robots paralelos asegurando que alcancen los espacios de trabajo requeridos, según las diferentes aplicaciones. En esta sección se explica el método utilizado para asegurar que el robot paralelo alcanza todos los puntos de un espacio de trabajo esférico de un radio determinado.

Para asegurar que el robot posee un espacio de trabajo que incluye el espacio esférico requerido, se crea una nube con un número significativo de puntos igualmente espaciados los cuales se ubican dentro de la esfera. En cada uno de los puntos se realizan las verificaciones cinemáticas para corroborar que el efector final del robot alcanza el punto señalado. Debe tenerse en consideración que la plataforma de Stewart-Gough posee seis grados de libertad, por lo tanto, para cada punto se debe corroborar que el efector final logra las diferentes orientaciones requeridas por la aplicación.

En la Figura 4 se puede apreciar el robot paralelo y la nube de puntos con las cuales se analiza que el robot logra abarcar el espacio de trabajo requerido. En esta gráfica se muestran tres ejemplos, donde son analizados tres puntos diferentes. Se puede observar que además de cambiar la posición del efector final también se cambia la orientación final del mismo.

Una vez se ha verificado que el robot alcanza todos los puntos que forman el espacio de trabajo esférico cumpliendo la restricción cinemática para todo el rango de orientaciones predefinido, se avala que el robot es idóneo para el espacio de trabajo planteado. En la Figura 5 se aprecia un robot paralelo que alcanza todos los puntos de la nube del espacio de trabajo requerido.

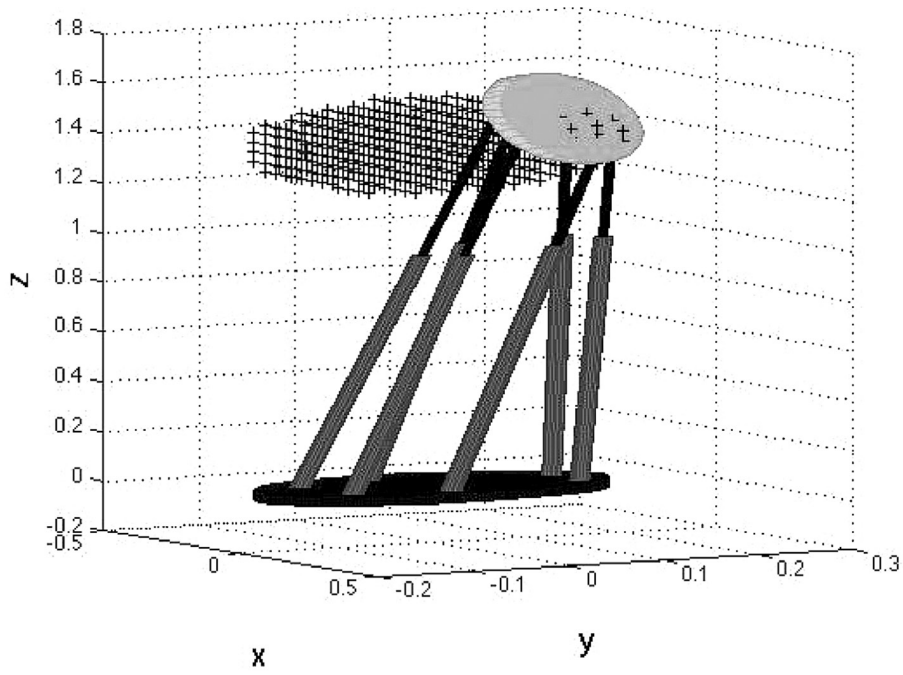


Figura 4(a). Ejemplo 1

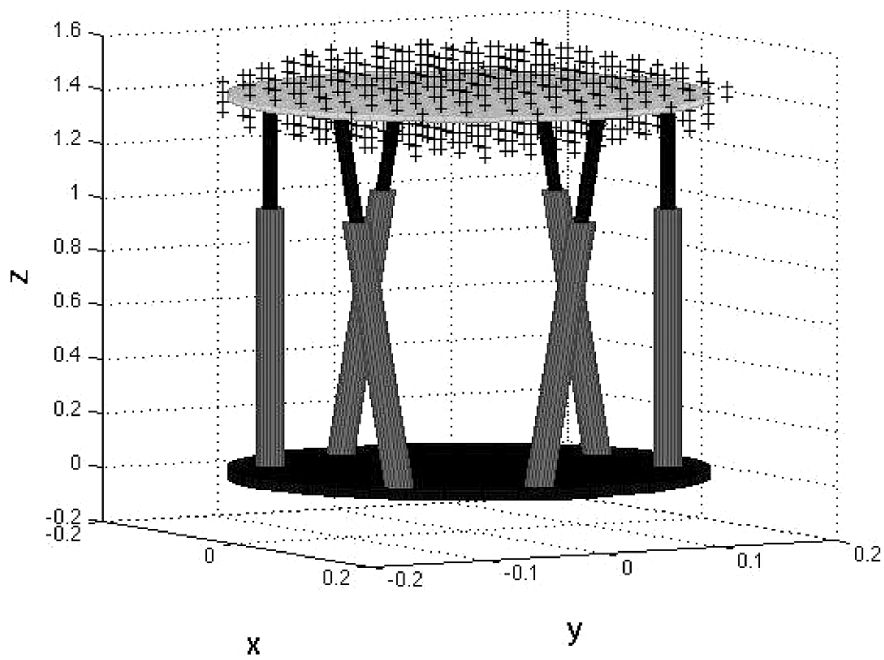


Figura 4 (b). Ejemplo 2



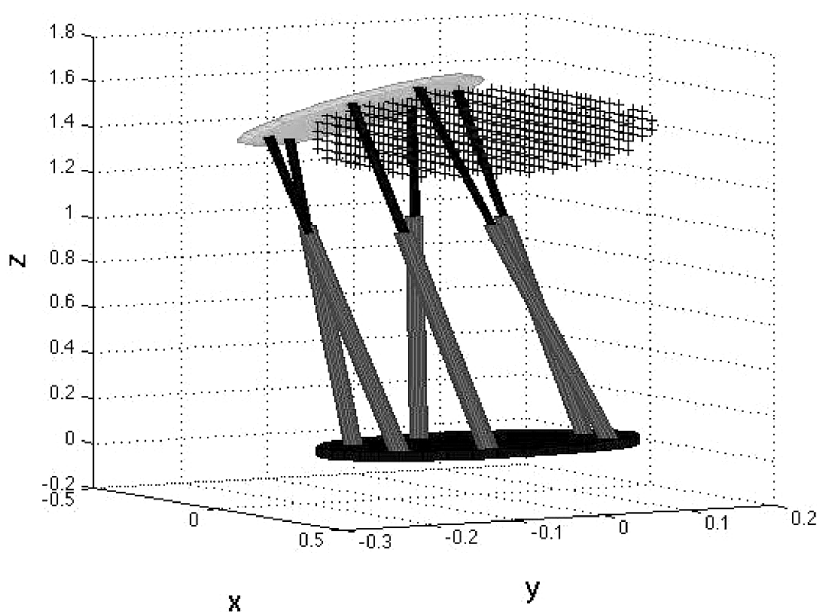
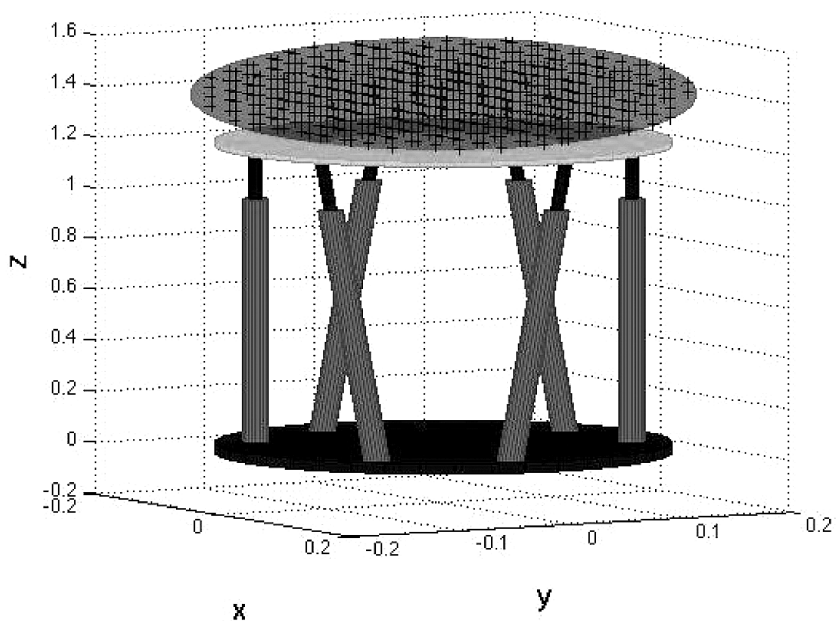


Figura 4 (c). Ejemplo 3

**Figura 4. Ejemplos de verificación de puntos ubicados dentro del espacio de trabajo requerido, señalando diferentes posiciones y orientaciones**



**Figura 5. Robot paralelo que alcanza todos los puntos del espacio de trabajo requerido**



## CÁLCULO ÓPTIMO DE LAS DIMENSIONES DEL ROBOT

Después de otorgado un espacio de trabajo se pueden crear varias estructuras paralelas que alcancen con su efector final todos los puntos contenidos en el mismo. Actualmente, una de las metas de los diseñadores de diferentes industrias es crear productos que requieran la menor cantidad de material para su construcción, evidenciando un diseño sostenible (conocido también como *green design*) con el fin de colaborar con el medio ambiente. Además de colaborar con el medio ambiente, este tipo de diseños permite una producción más rentable al disminuir los costos debido a la materia prima. También debe tenerse en cuenta que las optimizaciones basadas en la obtención de menores dimensiones suele coincidir con las basadas en menor consumo de energía, lo que implica una reducción del costo de operación, generando mayores índices de rentabilidad para las empresas y colaborando con el medio ambiente.

Con el fin de utilizar la menor cantidad de materia prima se decidió crear un robot con las menores dimensiones posibles, siempre y cuando se garantizase el cumplimiento de las restricciones del espacio de trabajo. Para este proceso de optimización se usaron algoritmos genéticos (GAs).

Los GAs son métodos adaptativos que imitan la adaptación y mutación de la evolución biológica, en el proceso de evolución natural, con el fin de resolver problemas que implican optimización.

Los algoritmos genéticos inician con una población cuyas características permiten la solución del problema, luego se compara la solución de cada uno y los individuos que producen la mejor solución (evaluados por una función de objetivo por su desempeño) sobreviven. Los genes de los individuos que sobreviven se pasan a la siguiente generación; esto, acompañado de procesos de combinación y mutación, posibilita el desarrollo de soluciones cada vez mejores. Según la teoría, la principal diferencia entre GAs

y los métodos tradicionales de optimización radica en cuatro puntos:

1. GAs busca una población de soluciones en paralelo, y no en un solo punto.
2. Los algoritmos genéticos no requieren de una información derivativa que guíe el proceso, la función objetivo y el desempeño requerido determinan la dirección de búsqueda.
3. GAs usa reglas de transición probabilísticas y no determinísticas.
4. Genera un número de soluciones potenciales que le permiten al usuario, si es necesario, seleccionar la más conveniente.

La Figura 6 muestra en el diagrama de flujo los algoritmos genéticos.

Los parámetros básicos usados en el proceso de optimización se muestran en la Tabla 1. Para realizar este proceso se desarrolló en Matlab un programa donde la función objetivo consiste en una función que relaciona las principales dimensiones de la estructura paralela (Ver ecuaciones 7 y 8), dentro de un rango de dimensiones preestablecido; los genes de cada individuo son las tres dimensiones principales del robot: 1) el tamaño de la plataforma fija; 2) el tamaño de la plataforma móvil; y 3) la longitud de los seis actuadores lineales.

$$\min_{x \in X} f(x) \quad (7)$$

$$f(x) = 2\pi x_1 + 2\pi x_2 + 6x_3 \quad (8)$$

Donde:

$$f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$$

$$X \subseteq \mathbb{R}^3$$

$x_1$  : Longitud del centro de la base fija a las articulaciones de cada brazo.

$x_2$  : Longitud del centro de la base móvil a las articulaciones de cada brazo.

$x_3$  : Longitud de los actuadores lineales.

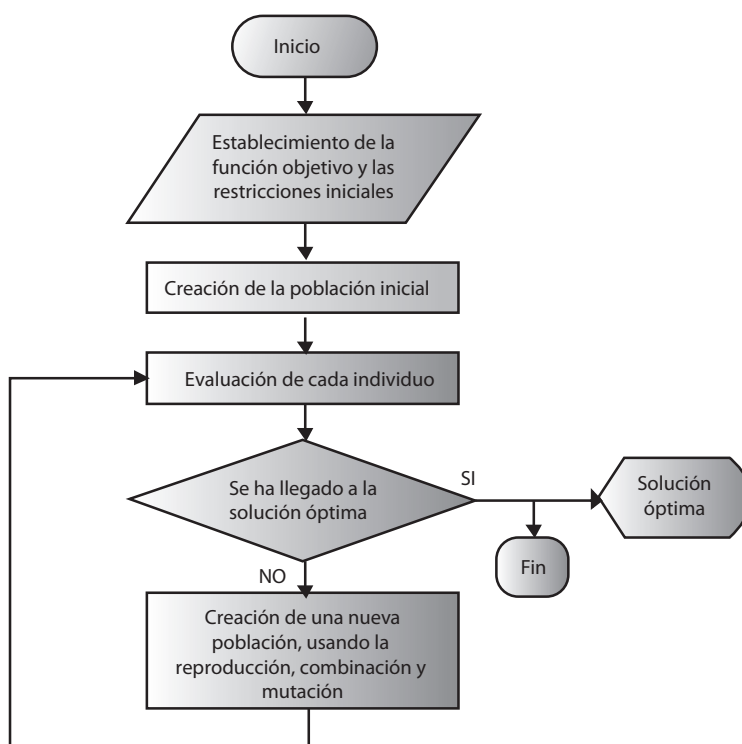


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo genético usado en la optimización

Tabla 1. Parámetros de cálculo para GAs

Parámetros	
Población (individuos por generación)	20
Máximo número de generaciones	100
Taza de mutación (función adaptativa)	0.8
Número de sobrevivientes (Elite Count)	2
Taza de recombinación	0.8

La búsqueda de dimensiones se normalizó para valores entre 0 y 1, de manera que los resultados sean escalables y extrapolables a cualquier tamaño de espacio de trabajo. Sin embargo, teniendo en cuenta las limitaciones mecánicas que se pueden presentar en el tamaño de las articulaciones y en los actuadores se dispuso que el rango de valores posibles para el radio de la plataforma fija

y móvil era de 0.1 a 1 y el rango para las dimensiones de los actuadores lineales de 0.3 a 1.

Existen otras consideraciones que se tuvieron en cuenta para el cálculo de las dimensiones del robot, entre las cuales se destacan el recorrido máximo y mínimo de los actuadores lineales y la ubicación del centro del espacio de trabajo con respecto a la plataforma fija del robot. Se creó una restricción que plantea el recorrido del vástago del actuador lineal en un 80% del tamaño del mismo; por lo tanto, la relación entre el recorrido máximo y mínimo será de 1.8. Después de tener presente esta consideración, se creó otra restricción que planteó el centro del espacio de trabajo esférico ubicado a distancia igual a la longitud del actuador lineal cuando su vástago se encuentra en la mitad del recorrido (1.4 veces la longitud del actuador cuando está contraído), esto permite evaluar de una manera más ecuánime las diferentes estructuras paralelas.

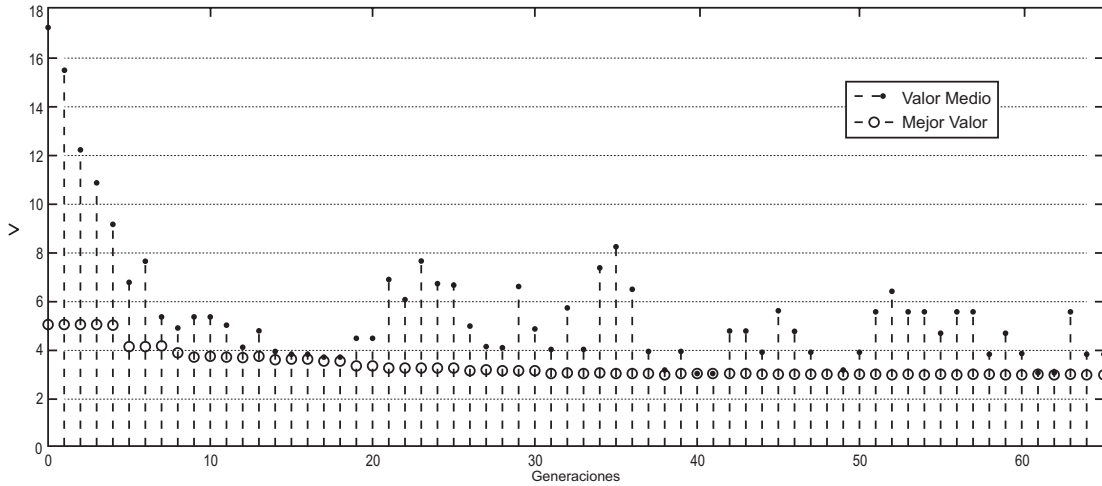
## RESULTADOS

Con base en el algoritmo planteado en la sección anterior, se procedió al cálculo óptimo de las dimensiones del robot paralelo para un espacio de trabajo esférico de radio 0.2 unidades. Para cada punto del espacio de trabajo se corroboraron 64 orientaciones diferentes del efector final que varían entre un rango de  $\pm 10$  grados con respecto a cada uno de los ejes coordenados. En la Figura 7 se ilustra la evolución del mejor valor y el valor medio de la función objetivo evaluado en las diferentes poblaciones.

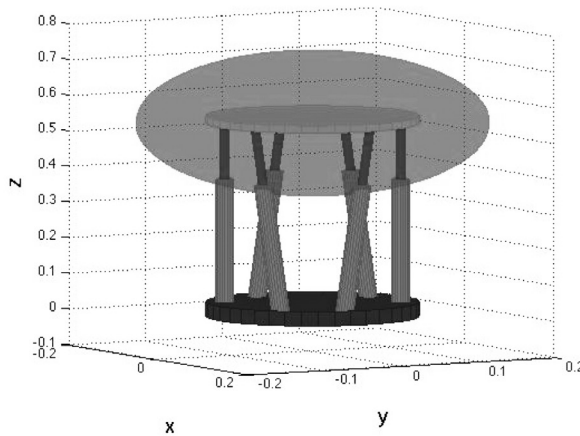
Se puede apreciar que el algoritmo converge en la iteración número 65.

**Tabla 2. Parámetros de cálculo para GAs**

Parámetros	
$x_1$ : Longitud del centro de la base fija a las articulaciones de cada brazo	0.1003
$x_2$ : Longitud del centro de la base móvil a las articulaciones de cada brazo	0.1003
$x_3$ : Longitud de los actuadores lineales	0.3850
Valor de la función objetivo	3.5704



**Figura 7. Evolución de los valores de la función objetivo, obtenidos con las técnicas de algoritmos genéticos**



**Figura 8. Plataforma Stewart-Gough con dimensiones óptimas, obtenidas con las técnicas de algoritmos genéticos**

## CONCLUSIONES

- El esquema de la plataforma paralela permitirá a estudiantes de diversas universidades tener acceso a prácticas de control, teleoperación y automatización orientadas hacia robótica paralela.
- Las técnicas basadas en algoritmos genéticos son una herramienta bastante útil para el cálculo de las dimensiones del robot paralelo con estructura Stewart-Gough, con el fin de minimizar sus dimensiones.
- El método del cálculo de espacio de trabajo por medio de verificación de un número significativo de puntos facilita un análisis muy aproximado de las condiciones cinemáticas, permitiendo conocer si un robot alcanza o no a cubrir el espacio de trabajo planteado.

## REFERENCIAS

- [1] Ahlgren, D. J. "An International View of Robotics as an Educational Medium". International Conference on Engineering Education (ICEE'2002). Manchester, UK.
- [2] Bianchi, R. A. C. and La Neve, A. "Studying Electrical and Computer Engineering through the Construction of Robotic Teams and Systems". International Conference on Engineering Education (ICEE'2002). Manchester, UK.
- [3] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 180, no. 1, pp. 371-386, 1965.
- [4] Dapeng Tang, Shuting Chen, Yingchun Wang, Shiming Ji. "ICAI Realization Method for Parallel Robot Instruction", Advanced Materials Research, vol. 189-193, pp. 3262-3265, 2011.
- [5] Dannelly, R. S. "Use of a Mobile Robot in a Data Structures Course". The Journal of Computing in Small Colleges, Volume 15, Number 3, 2000, pp. 85-90.
- [6] García, M. A. and Patterson-McNeill, H. "Learn how to develop software using the toy Lego Mindstorms". Frontiers in Education Conference FIE'2002). Boston, Mass.
- [7] Gustafson, D. "Using Robotics to Teach Software Engineering". Frontiers in Education Conference FIE'1998). Tempe, Arizona.
- [8] V. E. Gough, "Automobile stability, control, and tyre performance," Automobile Div., Inst. Mech. Eng., 1956.