



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

---



# **TESIS**

## **“ANÁLISIS PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE CAMABOT”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:

**ING. IXSHEL JHOSELYN FOSTER VÁZQUEZ**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. EDUARDO VÁZQUEZ SANTACRUZ**

CO-DIRECTOR DE TESIS

**DR. ROGELIO PORTILLO VÉLEZ**

**CIUDAD DEL CARMEN, CAMPECHE, NOV. 2019**

# *Dedicatoria*

*Dedico esta Tesis primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida, por darme salud y acompañarme en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente en los momentos de desesperación y angustia.*

*A mis amados padres Jorge y Socorro, por darme la vida y su amor incondicional, por sus consejos, paciencia y dedicación.*

*A mi hermano Luis por compartir momentos de alegría, por ser mi compañero de juegos y mi primer amigo en la vida, ¡Por Todo hermano!*

*A mi gran amor Erick, por estar en cada etapa de esta tesis, por motivarme cuando ya no veía la solución, por escucharme y ser mi compañero de vida.*

*A mis amigos y familiares en general.*

# *Agradecimientos*

*Agradezco a Dios, por darme la fuerza y sabiduría para concluir esta tesis, a mis familiares en general por su gran amor, paciencia y dedicación, a mis asesores de tesis, al Dr. Eduardo Vázquez y al Dr. Rogelio Portillo, a mis profesores, al Dr. Hussain Alazki y al Dr. Manuel May, gracias por su ayuda y consejos y a mis amigos en general que estuvieron en este proceso de tesis.*

*¡Gracias por todo!*

*Filipenses 4:13.*

# Resumen

La CamaBot es una cama robótica hospitalaria compuesta de manera modular por cuatro mecanismos básicos: mecanismo de soporte de colchón, mecanismo de paneo, mecanismo base de la cama y mecanismo de elevación. El mecanismo de elevación consiste en dos mecanismos Manivela-Corredera (MC) que en conjunto forman un sistema cinemático de 6 barras o eslabones. El problema que existe es que, en la etapa de pruebas y manufactura, el mecanismo de elevación presentó una falla por desgarre en las juntas del mecanismo y en las juntas de soldadura de los soportes de los actuadores. Actualmente, la CamaBot es funcional a partir de un rediseño realizado en dicha etapa. En esta tesis, se presenta el problema de síntesis dimensional del mecanismo de elevación para minimizar el error de seguimiento de trayectoria y restringir las fuerzas ejercidas en los actuadores y por lo tanto evitar el problema de desgarre en las juntas. El problema de síntesis del mecanismo se plantea como un problema de optimización no lineal con restricciones no lineales y debido a la complejidad no lineal que este presenta; la solución se obtiene mediante cálculos numéricos utilizando algoritmos genéticos, estos pueden resolver problemas de búsqueda y optimización, dar solución a problemas no lineales, operar de forma simultánea con varias soluciones (cosa que un método tradicional lo hace de manera secuencial), y no requerir información derivada, sino solo el valor de la función en diferentes puntos. La herramienta utilizada para la realización de este trabajo es la aplicación del Toolbox de algoritmos genéticos de la plataforma de Matlab® para el diseño, codificación, ejecución y pruebas de los modelos algorítmicos que se diseñan en este trabajo. El planteamiento de la función objetivo del problema de optimización en cuestión es la minimización del error de seguimiento de trayectoria deseada del mecanismo, mientras se satisfacen las restricciones de diseño de las fuerzas ejercidas por los actuadores del mecanismo de elevación, por medio de la selección óptima de las dimensiones de los eslabones del mecanismo.

# Abstract

CamaBot is a robotic hospital bed composed of four basic mechanisms: mattress support mechanism, panning mechanism, bed base mechanism and lifting mechanism. The lifting mechanism consists of two Crank-Sliding (MC) mechanisms that form a 6-bar or link kinematic system. The problem is that, at the testing and manufacturing stage, the lifting mechanism presented a failure due to mechanical tear at the joints' mechanism and in the welding joints of the actuator supports. Currently, the CamaBot is functional based on a redesign made at that stage. In this thesis, the problem of dimensional synthesis of the lifting mechanism is presented to minimize the trajectory tracking error while constraining the forces exerted on the actuators and therefore avoid the problem of mechanical tear at the joints. The problem of synthesis of the mechanism is stated as a non-linear optimization problem with non-linear constraints and due to the non-linear complexity that it presents; The solution is obtained through numerical calculations using genetic algorithms, these can solve search and optimization problems, solve non-linear problems, operate simultaneously with several solutions (something that a traditional method does sequentially), and not require derived information, but only the value of the function at different points. The selected tool to perform this work is the Matlab® platform with its genetic algorithm toolbox for the design, coding, execution and testing of the algorithmic models that are designed in this work. The approach of this work is to consider the objective function of the optimization problem as the minimization of the desired trajectory tracking error of the mechanism, while satisfying the design constraints of the forces exerted by the actuators of the lifting mechanism, by means of the optimal selection of the dimensions of the mechanism links.

# Índice general

<b>Dedicatoria</b> .....	I
<b>Agradecimientos</b> .....	II
<b>Resumen</b> .....	III
<b>Abstract</b> .....	IV
<b>Índice general</b> .....	V
<b>Nomenclatura</b> .....	VII
<b>Lista de símbolos</b> .....	VIII
<b>Lista de figuras</b> .....	IX
<b>Lista de tablas</b> .....	XI
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	1
<b>1.1 Estado del arte</b> .....	2
<b>1.2 Motivación</b> .....	5
<b>1.3 Objetivo general</b> .....	6
<b>1.4 Objetivos específicos</b> .....	6
<b>1.5 Contribución</b> .....	6
<b>1.6 Organización de la tesis</b> .....	7
<b>1.7 Artículos generados</b> .....	8
<b>Capítulo 2 Mecanismo de elevación de la CamaBot</b> .....	9
<b>2.1 Primer modelo cinemático del mecanismo de elevación</b> .....	11
<b>2.2 Problemática</b> .....	12

<b>Resumen del capítulo .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 3 Modelo cinemático del mecanismo de elevación .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Cálculo de fuerzas .....</b>	<b>24</b>
<b>Resumen del capítulo .....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo 4 Optimización con algoritmos evolutivos .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Algoritmos genéticos .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.1 Codificación de problemas .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Problema de optimización .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 Planteamiento del problema de optimización del mecanismo de elevación .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.1 Función objetivo .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.2 Vector de variable de diseño .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.3 Restricciones .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.4 Problema de optimización del mecanismo de elevación .....</b>	<b>38</b>
<b>Resumen del capítulo .....</b>	<b>39</b>
<b>Capítulo 5 Simulación .....</b>	<b>40</b>
<b>Resumen del capítulo .....</b>	<b>52</b>
<b>Capítulo 6 Análisis de resultados, conclusiones y trabajo futuro .....</b>	<b>53</b>
<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>Trabajo a futuro .....</b>	<b>60</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>61</b>

## Nomenclatura

MC	Manivela-Corredera.
AG	Algoritmos Genéticos.
M6B	Mecanismo de 6 Barras.
MC_1	Manivela-Corredera 1.
MC_2	Manivela-Corredera 2.
EE	Estrategias evolutivas.
PE	Programación evolutiva.
PG	Programación genética.

## Lista de símbolos

$\vec{R}_1 \dots \vec{R}_i$	Componentes del $i$ -ésimo eslabón del mecanismo de 6 barras.
$q_1 \dots q_i$	Componentes del $i$ -ésimo ángulo del mecanismo de 6 barras.
$(a_x, a_y)$	Coordenadas del punto $a$ del mecanismo de 6 barras.
$(d_x, d_y)$	Coordenadas del punto $d$ del mecanismo de 6 barras.
$r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{41}$	Eslabones del mecanismo manivela corredera 1.
$\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}$	Posiciones de los eslabones del mecanismo manivela corredera 1.
$r_{12}, r_{22}, r_{32}, r_{42}$	Eslabones del mecanismo manivela corredera 2.
$\theta_{12}, \theta_{22}, \theta_{32}, \theta_{42}$	Posiciones de los eslabones del mecanismo manivela corredera 2.
$P_a, P_b, P_c, P_d, D$	Eslabones restantes del mecanismo de elevación.
$\theta_{Pa}, \theta_{Pb}, \theta_{Pc}, \theta_{Pd}, \theta_d$	Posiciones de los eslabones restantes del mecanismo de elevación.
$P_2$	Punto de referencia $P_2$ del mecanismo de elevación.
$(P_{2x}, P_{2y})$	Coordenadas del punto de referencia $P_2$ del mecanismo de elevación.
$F_1, F_2$	Fuerzas aplicadas en los eslabones $r_{41}$ y $r_{42}$ respectivamente.
$x$	Vector de diseño $n$ -dimensional.
$f(x)$	Función objetivo.
$g_i(x)$	Restricciones de desigualdad.
$h_i(x)$	Restricciones de igualdad.
$a_i$ y $b_i$	Constantes.
$x_{min}$ y $x_{max}$	Cotas del vector de diseño $x$ .
$e$	Error cuadrático.
$(x_{sis}(i), Y_{sis}(i))$	Coordenadas $x, y$ de la trayectoria del sistema.
$(P_{1x}(i), P_{1y}(i))$	Coordenadas de la trayectoria del punto $P$ del mecanismo de elevación.
$x_c$	Vector de diseño del mecanismo de elevación.

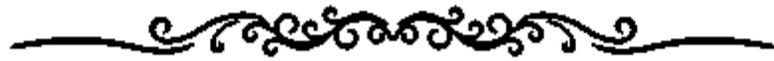
## Lista de figuras

<b>Fig. 2. 1</b> Mecanismo de soporte del colchón.....	9
<b>Fig. 2. 2</b> Mecanismo de paneo.....	9
<b>Fig. 2. 3</b> Mecanismo de base de la cama.....	10
<b>Fig. 2. 4</b> Mecanismo de elevación. ....	10
<b>Fig. 2. 5</b> Estructura cinemática del mecanismo de elevación (6 barras).....	11
<b>Fig. 2. 6</b> Armado del mecanismo de elevación. ....	13
<b>Fig. 2. 7</b> Acercamiento de las uniones de los eslabones del mecanismo de elevación.....	13
<b>Fig. 2. 8</b> Acercamiento de uno de los dos mecanismos MC. ....	13
<b>Fig. 2. 9</b> Soporte de la corredera del mecanismo de elevación. ....	14
<b>Fig. 2. 10</b> Armado final de la sección de elevación.....	14
<b>Fig. 3. 1</b> Mecanismo de elevación segunda aproximación. ....	16
<b>Fig. 3. 2</b> Mecanismo MC_1.....	17
<b>Fig. 3. 3</b> Mecanismo MC_2 acoplados a los eslabones Pb, Pc y Pd.....	21
<b>Fig. 3. 4</b> Análisis de fuerzas. ....	24
<b>Fig. 4. 1</b> Funcionamiento de un Algoritmo evolutivo.....	28
<b>Fig. 4. 2</b> Individuo genético binario.....	31
<b>Fig. 4. 3</b> Descripción grafica de la definición de máximo y mínimo. ....	34
<b>Fig. 4. 4</b> Trayectoria del mecanismo de elevación. ....	37
<b>Fig. 5. 1</b> CAD final de la CamaBot. ....	40
<b>Fig. 5. 2</b> Mecanismo de elevación en diferentes posiciones. ....	41
<b>Fig. 5. 3</b> Diagrama vectorial de la trayectoria del mecanismo de elevación.....	42
<b>Fig. 5. 4</b> Diagrama vectorial de la mejor simulación (simulación 5). ....	44
<b>Fig. 5. 5</b> Mecanismo obtenido de los programas modificados.....	46
<b>Fig. 5. 6</b> Eslabón <i>Pb</i> del mecanismo de elevación. ....	47
<b>Fig. 5. 7</b> Mecanismo obtenido con la trayectoria modificada. ....	48
<b>Fig. 5. 8</b> Mecanismo obtenido con la nueva trayectoria modificada. ....	50
<b>Fig. 6. 1</b> Mejor resultado para el diseño del mecanismo de elevación. ....	56

**Fig. 6. 2** Comparación del mecanismo de elevación original vs obtenido por el AG  
(a: altura máxima, b: altura mínima)..... 56

## Lista de tablas

<b>Tabla 3. 1</b> Selección del signo para una configuración cruzada. ....	20
<b>Tabla 4. 1</b> Pseudocódigo de un Algoritmo Evolutivo [21]. ....	29
<b>Tabla 4. 2</b> Pseudocódigo de un AG [21]. ....	33
<b>Tabla 4. 3</b> Coordenadas de la trayectoria deseada. ....	37
<b>Tabla 4. 4</b> Cotas del vector de diseño. ....	38
<b>Tabla 5. 1</b> Trayectoria original del mecanismo de elevación. ....	41
<b>Tabla 5. 2</b> Valores actuales del mecanismo de elevación. ....	41
<b>Tabla 5. 3</b> Resultados de las primeras 10 simulaciones. ....	43
<b>Tabla 5. 4</b> Trayectoria del mecanismo de la simulación 5. ....	44
<b>Tabla 5. 5</b> Nuevas cotas del vector de diseño. ....	45
<b>Tabla 5. 6</b> Valores del vector de diseño y de las fuerzas F1 y F2 del mecanismo de la figura 5.5. ....	46
<b>Tabla 5. 7</b> Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.5. ....	46
<b>Tabla 5. 8</b> Trayectoria modificada y utilizada como trayectoria de referencia. ....	48
<b>Tabla 5. 9</b> Valores del vector de diseño y de las fuerzas F1 y F2 del mecanismo de la figura 5.7. ....	48
<b>Tabla 5. 10</b> Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.7. ....	49
<b>Tabla 5. 11</b> Nueva trayectoria modificada y utilizada como trayectoria de referencia. ....	49
<b>Tabla 5. 12</b> Valores del vector de diseño y de las fuerzas F1 y F2 del mecanismo de la figura 5.8. ....	50
<b>Tabla 5. 13</b> Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.8. ....	51
<b>Tabla 6. 1</b> Vectores de diseño y fuerzas de todos los mecanismos obtenidos por los AG. ....	54
<b>Tabla 6. 2</b> Trayectoria de todos los mecanismos obtenidos por los AG. ....	55
<b>Tabla 6. 3</b> Trayectoria original del mecanismo de elevación. ....	57
<b>Tabla 6. 4</b> Comparación de las fuerzas del mecanismo original vs el mecanismo obtenido por el AG a distintas alturas. ....	58



# *Capítulo 1*



# Introducción

El problema de movilidad en personas de edad avanzada y personas con discapacidad motriz hoy en día implica soluciones utilizando dispositivos con un grado de inteligencia que asistan a dichos individuos para lograr un movimiento autónomo sin muchas complicaciones y sí con múltiples beneficios.

La CamaBot es un dispositivo inteligente basado en la tecnología robótica para el cuidado de la salud de pacientes con discapacidad motriz. Consiste en un sistema mecatrónico y de monitoreo de movimientos automáticos de una cama robótica de hospital que se apoya de la clasificación de posturas mediante el reconocimiento de patrones. La cama soporta un peso máximo de 300 Kg y está integrada por cuatro mecanismos básicos: soporte del colchón, paneo, base de la cama y mecanismo de elevación; con los cuáles se logran 12 posiciones de operación para la cama [1]

En la actualidad el dispositivo se encuentra en funcionamiento en etapas de pruebas en el hospital Juárez de México, sin embargo, fue necesario realizar un rediseño en el mecanismo de elevación dado que, en las uniones y en los soportes de los actuadores, se presentó una falla mecánica por desgarramiento mecánico, debido a la fuerza ejercida por la cama al elevarse con carga máxima. De este problema, surge la propuesta de aplicar una técnica de optimización utilizando Algoritmos Genéticos (AG) para restringir la fuerza ejercida por la cama en las secciones de interés (soporte de los actuadores), por medio de una selección óptima de la longitud de sus eslabones.

Los algoritmos genéticos son métodos estocásticos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en la teoría de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin. Los principios básicos de los AG fueron establecidos por Holland [2] (1975) y posteriormente Goldberg [3] (1989) amplió los fundamentos teóricos y las aplicaciones de AG. Algunas de las ventajas de utilizar un método de optimización con algoritmos genéticos, es que los AG son capaces de trabajar con un gran

número de variables, hacer una búsqueda simultánea en varias direcciones mediante el uso de una población de posibles soluciones, pueden dar solución a problemas con un grado de dificultad elevado, no necesitan información a priori del problema a resolver y utilizan indicadores probabilísticos, en lugar de determinísticos [31].

Los AG usan una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos creando así una población de posibles soluciones, este proceso se repite hasta que la población converja hacia una solución óptima del problema.

## **1.1 Estado del arte**

Resolver un problema de optimización, en el contexto de los AG, significa encontrar al mejor individuo o variable que maximice o minimice una función respecto a ciertas restricciones. Los conceptos básicos relacionados con la optimización matemática fueron establecidos en los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Lagrange [4] y Euler [5] respectivamente, pero no fue hasta el siglo XX que Kantorovich y Dantzing [6] definieron los principios de la programación matemática.

A continuación, se mencionan algunos trabajos utilizando métodos clásicos de optimización para estructuras mecánicas.

En 1972, Pauli Pedersen [7] propuso una solución al problema del diseño de masa mínima de armazones de usos múltiples utilizando un método de gradiente, donde las variables de diseño son las áreas de las barras y las posiciones de las juntas. Tomó en cuenta las restricciones de desplazamiento y las restricciones de tensión no constante (estabilidad).

En 1974, Reinschmidt y Russell [8] aplicaron técnicas de programación lineal para encontrar diseños de armaduras con pesos mínimos para satisfacer condiciones de estabilidad. Además, descartan partes no factibles conduciendo a mejores configuraciones de armaduras.

En 1977, Lipson y Gwin [9] aplicaron el método complex para optimizar el diseño de peso mínimo de las estructuras de armazón tridimensional utilizando variables de tamaño y geométricas, con posibilidad de eliminación de miembros.

Algunos problemas de diseño óptimo se han resuelto con un método que utiliza los multiplicadores de Lagrange aumentados, combinados con un algoritmo de ramificación y enlace [32]. Para calcular los gradientes de las funciones, se han utilizado funciones de interpolación para unir los parámetros discretos a la variable discreta, de la que dependen. Se han obtenido buenos resultados para muchos problemas de diseño. Sin embargo, para algunas estructuras complejas, no se puede obtener una expresión analítica simple que relacione los diferentes parámetros con una variable discreta. Los gradientes de las funciones no se pueden calcular, por lo que no se pueden utilizar los métodos clásicos, debido a esa problemática se opta por utilizar técnicas meta-heurísticas como los algoritmos genéticos, estos difieren de los métodos de optimización tradicionales por el hecho de que no requiere información derivada. Solo requiere el valor de las funciones en diferentes puntos [33].

A continuación, se presentan algunos trabajos utilizando técnicas de optimización basados en algoritmos genéticos para la optimización de diseños mecánicos.

En 1997, Jenkins [10] demostró la ventaja de utilizar técnicas de optimización con Algoritmos Genéticos para obtener una estructura con una masa óptima.

En 1998, Annicchiarico y Cerrolaza [11] aplicaron técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos para estructuras bidimensionales de elementos finitos, sujeto a restricciones de tensión, desplazamiento y pandeo.

En el 2000 Coello y Christiansen [12] propusieron el uso de algoritmos genéticos como una herramienta para resolver problemas de optimización multiobjetivo en estructuras mecánicas usando el concepto de mínimo y máximo.

En el 2001, Deb y Gulati [13] aplicaron AG para encontrar el tamaño óptimo de la sección transversal, la topología y la configuración de estructuras 2-D y 3-D y obtener una masa mínima de dichas estructuras.

En el 2013, A. Ortiz et al [14] propusieron un algoritmo de evolución diferencial con parámetros de control auto adaptativos para resolver la síntesis dimensional de los mecanismos de cuatro y seis barras para la generación de trayectorias, donde incluyen un nuevo operador de mutación para resolver el estancamiento en mínimos locales.

En el 2016, J. Pantoja et al [15] diseñaron un mecanismo planar de ocho eslabones con un grado de libertad como extremidad bípida, para el diseño del mecanismo propusieron formalmente la síntesis dimensional como un problema de optimización numérica, donde utilizaron un algoritmo de evolución diferencial con distintos factores de cruce con el propósito de obtener diseños viables dentro del espacio de las soluciones reales en el problema de optimización.

Por otro lado, se presenta un trabajo en la realización de un diseño óptimo para una cama de hospital utilizando AG y la mención del trabajo de elaboración de la CamaBot.

En el 2011 Kittipichai [16], propuso un procedimiento de optimización para el diseño de la estructura de una cama de hospital utilizando algoritmos genéticos. La novedad de la estructura de la cama es que tiene un soporte para colocar la pierna izquierda o derecha para pacientes con férula.

En el 2013 [1], se realizó el diseño y construcción de una cama hospitalaria (CamaBot) basándose en el estudio de las necesidades de pacientes con discapacidad motriz del Hospital Juárez de México. Este dispositivo es capaz de soportar un máximo de 300 Kg y está compuesto por cuatro mecanismos indispensables (soporte del colchón, paneo, base de la cama y mecanismo de elevación) que hacen posible 12 posiciones para la cama.

## 1.2 Motivación

La CamaBot está compuesta por cuatro mecanismos básicos, de los cuales el mecanismo de elevación es el punto focal de este trabajo. La problemática que existe en esta sección es que debido a la fuerza que ejerce la cama sobre los actuadores, los soportes y uniones del mecanismo de elevación, se presentaron fallas mecánicas por desgarre mecánico en las uniones de soldadura.

Esta falla mecánica se debió al proceso de manufactura en el cual se soldaron soleras de acero A36 como soporte para los actuadores (una para cada soporte del actuador). De esta manera, toda la fuerza de los actuadores se transmitía solamente a un punto de soporte (una solera) que finalmente cedió por la carga aplicada. La solución para este problema fue soldar una solera extra para cada soporte de cada actuador, con lo que la carga se distribuyó mejor y se evitó el desgarre.

Posteriormente, al realizar la posición más baja del mecanismo de elevación, se detectó saturación de corriente en los actuadores. Esto indicó que, para esta condición del mecanismo, la fuerza necesaria era mayor para tener un desempeño adecuado, por lo que se plantea el problema de optimizar las longitudes de los eslabones para minimizar la fuerza de los actuadores.

Para tratar de resolver el problema que se tiene en la sección de elevación de la CamaBot, se implementará una técnica de optimización utilizando algoritmos evolutivos, siendo el algoritmo genético la técnica seleccionada para este trabajo debido a las principales ventajas que este nos brinda; como una convergencia sin el uso de funciones con variables discretas y no derivables [34], con el propósito de obtener diseños de mecanismos similares al mecanismo original (mecanismo de elevación), pero sin exceder con las fuerzas establecidas.

## **1.3 Objetivo general**

Aplicar una técnica de optimización utilizando algoritmos genéticos para optimizar la geometría del mecanismo de elevación, minimizando el error de seguimiento de trayectorias mientras que las fuerzas ejercidas en los actuadores satisfacen las restricciones de diseño.

## **1.4 Objetivos específicos**

- Estudiar técnicas de solución de problemas de optimización usando algoritmos genéticos (AG).
- Definir la función objetivo y las restricciones del problema de optimización.
- Seleccionar el AG para el problema de optimización.
- Resolver el problema de diseño del mecanismo de elevación con el AG.
- Analizar las soluciones obtenidas con el AG en la solución del problema.

## **1.5 Contribución**

La aportación al campo de investigación de las técnicas de optimización utilizando algoritmos evolutivos (heurísticas), será implementar un AG para restringir la fuerza ejercida en los puntos de apoyo de los actuadores del mecanismo de elevación de la CamaBot, por medio de la selección óptima de las dimensiones de los eslabones. La elección de utilizar algoritmos genéticos fue en base a que los AG pueden dar solución a problemas que no se adaptan bien a los algoritmos de optimización estándar, incluidos aquellos problemas en los que la función objetivo es discontinua, no diferenciable, estocástica o altamente no lineal [35].

Además, es un trabajo que forma parte de un proyecto más complejo con objetivos de innovación ya que se pretende explotar comercialmente la CamaBot en beneficio de la sociedad mexicana y latinoamericana. En este sentido, la aportación también consiste en impulsar y fortalecer los esfuerzos en el marco del ejercicio de innovación mediante la vinculación de proyectos con potencial de alto impacto social y grupos académicos de investigación.

## **1.6 Organización de la tesis**

El presente trabajo está conformado por un total de seis capítulos. En el primer capítulo se introduce al tema de tesis, empezando con una breve descripción de la CamaBot y los AG, se presenta el estado del arte, se explica la problemática del trabajo en la motivación, se plantean los objetivos generales y específicos, por último, se detalla la aportación de este trabajo de tesis. En el capítulo 2 se hace una descripción breve de los mecanismos principales de la CamaBot y en específico de la sección de interés (mecanismo de elevación), se presenta el primer modelo cinemático del mecanismo de elevación y por último se explica sobre la problemática de la CamaBot respecto a la sección de interés, seguidamente en el capítulo 3 se obtiene el nuevo modelo cinemático del mecanismo de elevación y se plantean las ecuaciones de fuerzas. En el capítulo 4 se introduce al tema de optimización con algoritmos evolutivos en general, se explica un poco más sobre los AG y por último se hace el planteamiento del problema de optimización del mecanismo de elevación. En el capítulo 5 se presentan las simulaciones de los resultados de los mecanismos obtenidos por el AG y finalmente en el capítulo 6 se tiene el análisis de los resultados, las conclusiones y el trabajo futuro.

## **1.7 Artículos generados**

Aceptación del artículo “*Sobre la síntesis óptima de mecanismos*” presentado en la ciudad de Querétaro, en el 4to Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática (CIERMMI 2019).

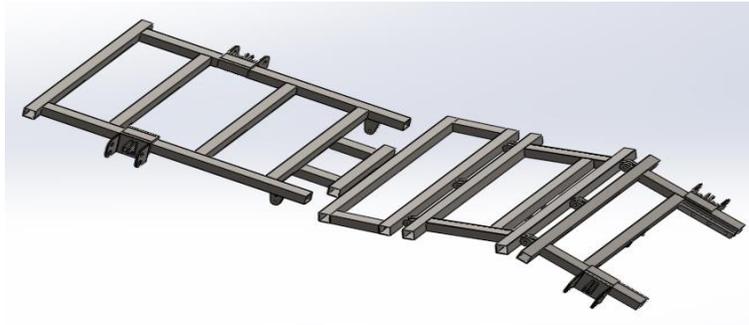


# *Capítulo 2*



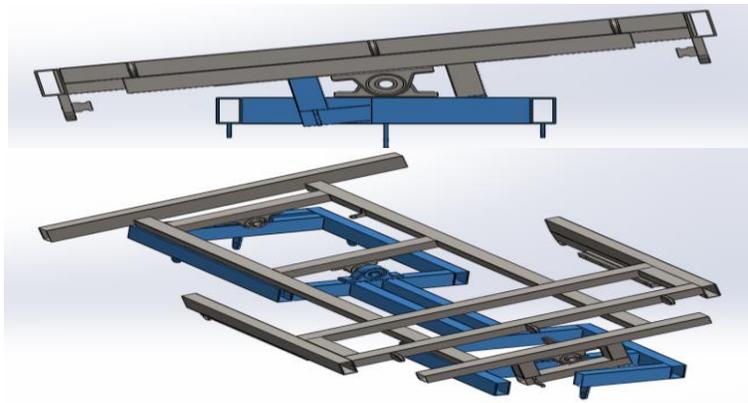
## Mecanismo de elevación de la CamaBot

La CamaBot es una cama robótica hospitalaria, diseñada para el cuidado de pacientes con problemas motrices, está compuesta por 4 mecanismos básicos (soporte del colchón, paneo, base de la cama y mecanismo de elevación) [1]. El mecanismo de soporte del colchón es un conjunto de mecanismos en forma de bisagra donde descansa todo el cuerpo del paciente como se muestra en la figura 2.1.



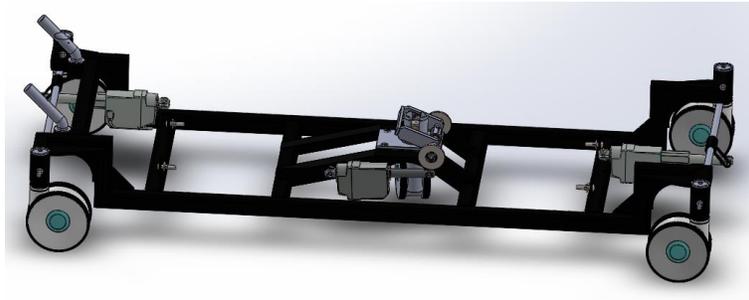
**Fig. 2. 1** Mecanismo de soporte del colchón.

El mecanismo de paneo está acoplado al mecanismo de elevación y es el encargado de que la cama se mueva con una inclinación a la derecha o izquierda [1] como se presenta en la figura 2.2 parte azul.



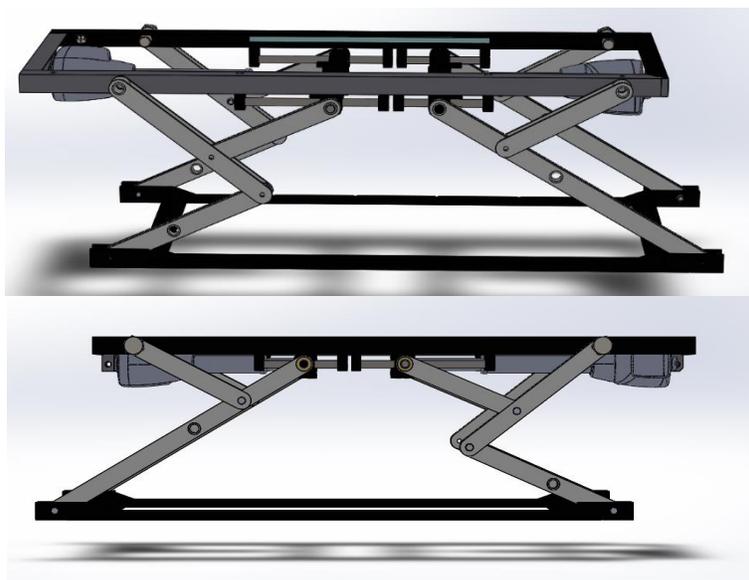
**Fig. 2. 2** Mecanismo de paneo.

En la figura 2.3 se observa la base de la cama y es el mecanismo encargado de dar estabilidad al paciente cuando la cama está en reposo o en movimiento; este mecanismo tiene una forma rectangular y está acoplado directamente con el mecanismo de elevación. [1]



**Fig. 2. 3** Mecanismo de base de la cama.

El mecanismo de elevación (figura 2.4) consta de dos mecanismos manivela-corredera acoplados a un mecanismo de seis barras que permite el desplazamiento vertical y longitudinal de la sección; este mecanismo es responsable de las posiciones Trendelenburg y anti-Trendelenburg y a lo largo de este trabajo será nuestro punto focal de estudio.



**Fig. 2. 4** Mecanismo de elevación.

## 2.1 Primer modelo cinemático del mecanismo de elevación

Como primera aproximación, el mecanismo de elevación fue definido como un mecanismo de 6 barras (M6B), en la figura 2.5 se muestra la estructura cinemática del mecanismo en general.

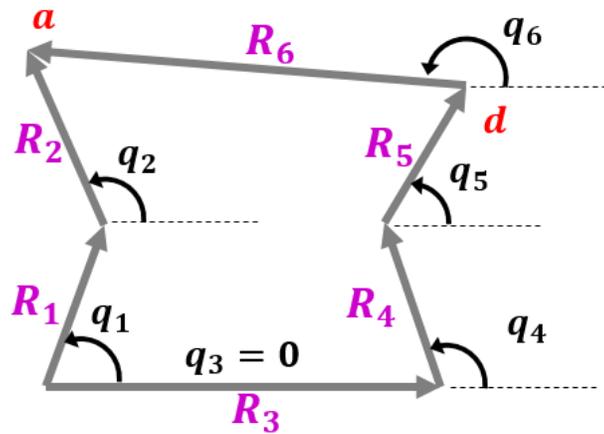


Fig. 2. 5 Estructura cinemática del mecanismo de elevación (6 barras).

De la figura 2.5, se puede establecer la ecuación vectorial 2.1, la cual se satisface para cualquier posición del mecanismo. Por lo tanto, se pueden establecer sus componentes cartesianas como se presenta en las ecuaciones 2.2 y 2.3.

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_2 = \vec{R}_3 + \vec{R}_4 + \vec{R}_5 + \vec{R}_6 \quad (2.1)$$

$$r_1 \cos(q_1) + r_2 \cos(q_2) = r_3 \cos(q_3) + r_4 \cos(q_4) + r_5 \cos(q_5) + r_6 \cos(q_6) \quad (2.2)$$

$$r_1 \sin(q_1) + r_2 \sin(q_2) = r_3 \sin(q_3) + r_4 \sin(q_4) + r_5 \sin(q_5) + r_6 \sin(q_6) \quad (2.3)$$

Donde

$\vec{R}_i$   $i = 1, 2, \dots, 6$  es el  $i$ -ésimo eslabón del M6B.

$q_i$   $i = 1, 2, \dots, 6$  es el  $i$ -ésimo ángulo del M6B.

De las ecuaciones 2.2 y 2.3, cuando  $q_6 = 0$ , coincide la posición en el eje Y de los puntos **a** y **d**. Por lo tanto, la altura del mecanismo puede definirse por la posición del punto **a** o **d**, si la orientación del vector  $q_6$  es nula. Las posiciones verticales del punto  $a_y$  y  $d_y$  están dadas por las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente. Las posiciones horizontales del punto  $a_x$  y  $d_x$  están dadas por las ecuaciones 2.6 y 2.7, respectivamente.

$$a_y = r_1 \sin(q_1) + r_2 \sin(q_2) \quad (2.4)$$

$$d_y = r_3 \sin(q_3) + r_4 \sin(q_4) + r_5 \sin(q_5) \quad (2.5)$$

$$a_x = r_1 \cos(q_1) + r_2 \cos(q_2) \quad (2.6)$$

$$d_x = r_3 \cos(q_3) + r_4 \cos(q_4) + r_5 \cos(q_5) \quad (2.7)$$

## 2.2 Problemática

La CamaBot es un dispositivo mecatrónico integrado por diferentes partes mecánicas con la finalidad de brindar asistencia a personas con problemas motrices. Durante la etapa de pruebas y manufactura, este dispositivo presentó una falla mecánica por desgarro en las uniones y soportes de los actuadores debido al exceso de esfuerzo ejercido en dichas áreas.

A continuación, se presenta en la figura 2.6 el armado del mecanismo de elevación, seguido de un acercamiento de las uniones del mecanismo y de una parte de uno de los dos mecanismos MC (figuras 2.7 y 2.8 respectivamente).



**Fig. 2. 6** Armado del mecanismo de elevación.



**Fig. 2. 7** Acercamiento de las uniones de los eslabones del mecanismo de elevación.



**Fig. 2. 8** Acercamiento de uno de los dos mecanismos MC.

En la figura 2.9 se presenta el soporte de la corredera, esta parte está acoplada con los actuadores; en la figura 2.10 se observan estos elementos como parte del armado final de la sección de elevación.



**Fig. 2. 9** Soporte de la corredera del mecanismo de elevación.



**Fig. 2. 10** Armado final de la sección de elevación.

## Resumen del capítulo

En este capítulo se describe a grandes rasgos los 4 mecanismos básicos de la CamaBot (soporte del colchón, paneo, base de la cama y mecanismo de elevación), se hace una introducción de la parte de interés (mecanismo de elevación) y se explica la problemática que se tuvo en dicha sección, de igual forma se presentan algunas imágenes del proceso de armado del mecanismo y su resultado final.



# *Capítulo 3*



# Modelo cinemático del mecanismo de elevación

El mecanismo de elevación es el dispositivo encargado de dar estabilidad al paciente y de regular la altura que este mismo necesite. En el capítulo anterior se dió a conocer la primera aproximación del mecanismo de elevación como un mecanismo de 6 barras, sin embargo, para este trabajo de tesis se realizó un modelo considerando los dos mecanismos manivela-corredera acoplados al mecanismo de 6 barras, este se observa en la figura 3.1. Es importante mencionar que, para el análisis siguiente y por simplicidad, se consideró un giro de 180 grados del mecanismo. Con esto, los actuadores quedan ahora en la parte de abajo del mecanismo de elevación de Camabot.

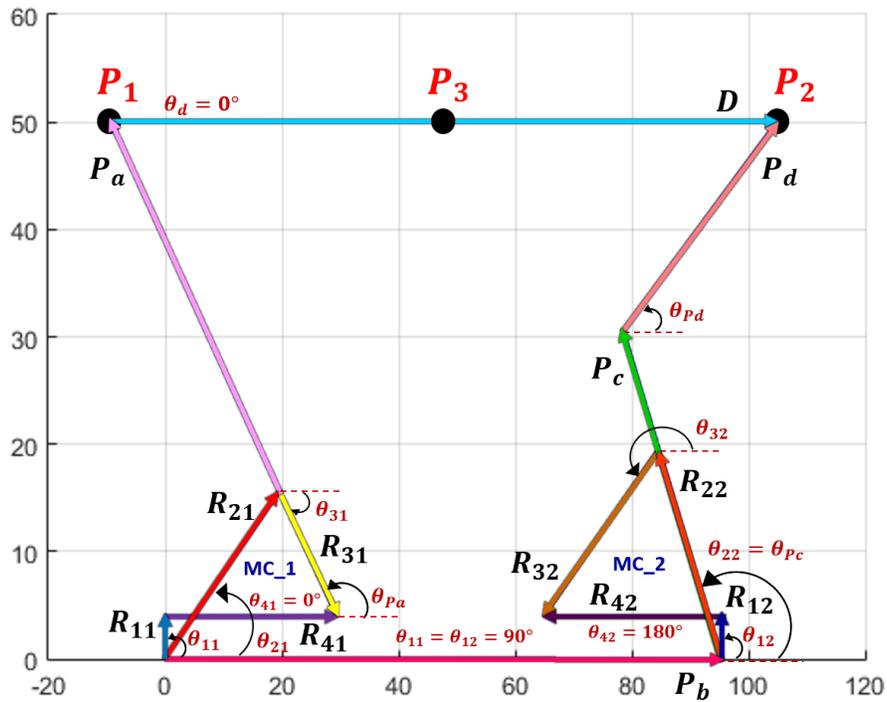


Fig. 3. 1 Mecanismo de elevación segunda aproximación.

Para obtener el modelo cinemático del mecanismo de elevación (figura 3.1), primero se hizo el cálculo de la cinemática del mecanismo Manivela-Corredera 1 (MC\_1) como un mecanismo independiente (figura 3.2), se tomó como referencia el cálculo de la cinemática de un mecanismo Manivela-Corredera (MC) estándar con algunas modificaciones [17].

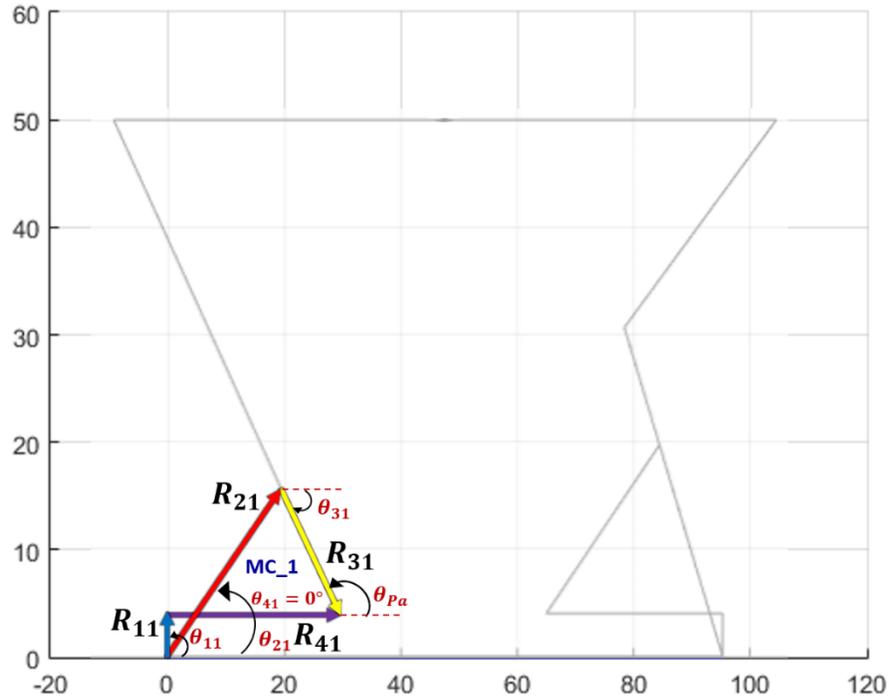


Fig. 3. 2 Mecanismo MC\_1.

Como primer paso se obtiene la ecuación de circuito cerrado descrita por la ecuación 3.1.

$$r_{21} + r_{31} = r_{11} + r_{41} \tag{3.1}$$

Aplicado la forma polar a cada uno de los elementos de la ecuación 3.1, se obtiene:

$$r_{21}e^{j\theta_{21}} + r_{31}e^{j\theta_{31}} = r_{11}e^{j\theta_{11}} + r_{41}e^{j\theta_{41}} \tag{3.2}$$

Aplicando la ecuación de Euler a la ecuación 3.2 y separando la parte real de la imaginaria se obtiene la ecuación 3.3.

$$\begin{aligned} r_{21} \cos \theta_{21} + r_{31} \cos \theta_{31} &= r_{11} \cos \theta_{11} + r_{41} \cos \theta_{41} \\ r_{21} \sin \theta_{21} + r_{31} \sin \theta_{31} &= r_{11} \sin \theta_{11} + r_{41} \sin \theta_{41} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Los pasos anteriores son prácticamente los mismos que se requieren para el cálculo de la cinemática de un mecanismo de cuatro barras [17], sin embargo, para un mecanismo MC, el ángulo  $\theta_{11}$  del sistema de ecuaciones 3.3 se sustituye por  $(\theta_{41} - 90)$ , quedando el sistema de ecuaciones 3.4. El cambio de ángulo define la configuración del mecanismo MC (El cálculo presentado es para una configuración abierta).

$$\begin{aligned} r_{21} \cos \theta_{21} + r_{31} \cos \theta_{31} &= r_{11} \cos(\theta_{41} - 90) + r_{41} \cos \theta_{41} \\ r_{21} \sin \theta_{21} + r_{31} \sin \theta_{31} &= r_{11} \sin(\theta_{41} - 90) + r_{41} \sin \theta_{41} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Simplificando la ecuación queda:

$$\begin{aligned} r_{21} \cos \theta_{21} + r_{31} \cos \theta_{31} &= r_{11} \sin \theta_{41} + r_{41} \cos \theta_{41} \\ r_{21} \sin \theta_{21} + r_{31} \sin \theta_{31} &= -r_{11} \cos \theta_{41} + r_{41} \sin \theta_{41} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Para obtener la posición angular de  $\theta_{31}$ , el lado izquierdo del sistema de ecuaciones (3.5) debe expresarse en términos de  $\theta_{21}$ , como la ecuación 3.6.

$$\begin{aligned} r_{21} \cos \theta_{21} &= r_{11} \sin \theta_{41} + r_{41} \cos \theta_{41} - r_{31} \cos \theta_{31} \\ r_{21} \sin \theta_{21} &= -r_{11} \cos \theta_{41} + r_{41} \sin \theta_{41} - r_{31} \sin \theta_{31} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Elevando al cuadrado y sumando sus términos de la ecuación 3.6, se obtiene la ecuación de Freudenstein en forma compacta [18], ecuación 3.7.

$$A \cos \theta_{31} + B \sin \theta_{31} + C = 0 \quad (3.7)$$

donde:

$$\begin{aligned} A &= -2(r_{11}r_{31} \sin \theta_{41} + r_{41}r_{31} \cos \theta_{41}) \\ B &= 2(r_{11}r_{31} \cos \theta_{41} - r_{41}r_{31} \sin \theta_{41}) \end{aligned}$$

$$C = r_{11}^2 - r_{21}^2 + r_{31}^2 + r_{41}^2$$

La ecuación 3.7 presenta una única incógnita  $\theta_{41}$  pero es argumento de dos funciones diferentes, por lo tanto, se deben aplicar las siguientes identidades trigonométricas (ecuación 3.8).

$$\cos \theta = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}, \quad \sin \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}} \quad (3.8)$$

Sustituyendo la ecuación 3.8 en la ecuación 3.7, se obtiene la ecuación lineal de segundo orden (ecuación 3.9).

$$(C - A) \tan^2 \frac{\theta_{31}}{2} + 2B \tan \frac{\theta_{31}}{2} + (A + C) = 0 \quad (3.9)$$

Resolviendo la ecuación 3.9, se obtiene la posición angular de  $\theta_{31}$  (ecuación 3.10).

$$\theta_{31} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C - A} \right) \quad (3.10)$$

Para obtener  $\theta_{21}$  se debe de realizar un procedimiento similar al anterior, por lo tanto, de la ecuación 3.5 se obtiene la ecuación de Freudenstein en forma compacta [18] (ecuación 3.11).

$$D \cos \theta_{21} + E \sin \theta_{21} + F = 0 \quad (3.11)$$

donde:

$$D = -2(r_{11}r_{21} \sin \theta_{41} + r_{41}r_{21} \cos \theta_{41})$$

$$E = 2(r_{11}r_{21} \cos \theta_{41} - r_{41}r_{21} \sin \theta_{41})$$

$$F = r_{11}^2 + r_{21}^2 - r_{31}^2 + r_{41}^2$$

Por lo tanto,  $\theta_{21}$  está dado por la ecuación 3.12.

$$\theta_{21} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-E \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{F - D} \right) \quad (3.12)$$

El cálculo realizado anteriormente es válido para un mecanismo MC con una configuración abierta, sin embargo, la configuración que se requiere es una configuración cruzada, para lograr esta configuración se muestra en la tabla 3.1 los signos que deben adoptar los radicales de las ecuaciones 3.10 y 3.12 y el eslabón  $r_{11}$ .

**Tabla 3. 1** Selección del signo para una configuración cruzada.

Configuración del mecanismo MC	$r_{11}$	$\theta_{31}$	$\theta_{21}$
Cruzada	-1	$-\sqrt{\quad}$	$+\sqrt{\quad}$

Como segunda parte del procedimiento para el cálculo de la cinemática del mecanismo de elevación se calcula el ángulo de  $\theta_{Pa}$  a partir de  $\theta_{31}$  (ecuación 3.10), por lo tanto, se tiene:

$$\theta_{Pa} = \theta_{31} + \pi \tag{3.13}$$

Seguidamente se define el ángulo  $\theta_d = 0$ , ya que el eslabón del soporte del colchón (eslabón D) se desea mantener siempre en esa posición.

La tercera parte consiste en el cálculo de la cinemática del mecanismo manivela corredera 2 (MC\_2) y los eslabones restantes que conducen al punto P2 como se observa en la figura 3.3.

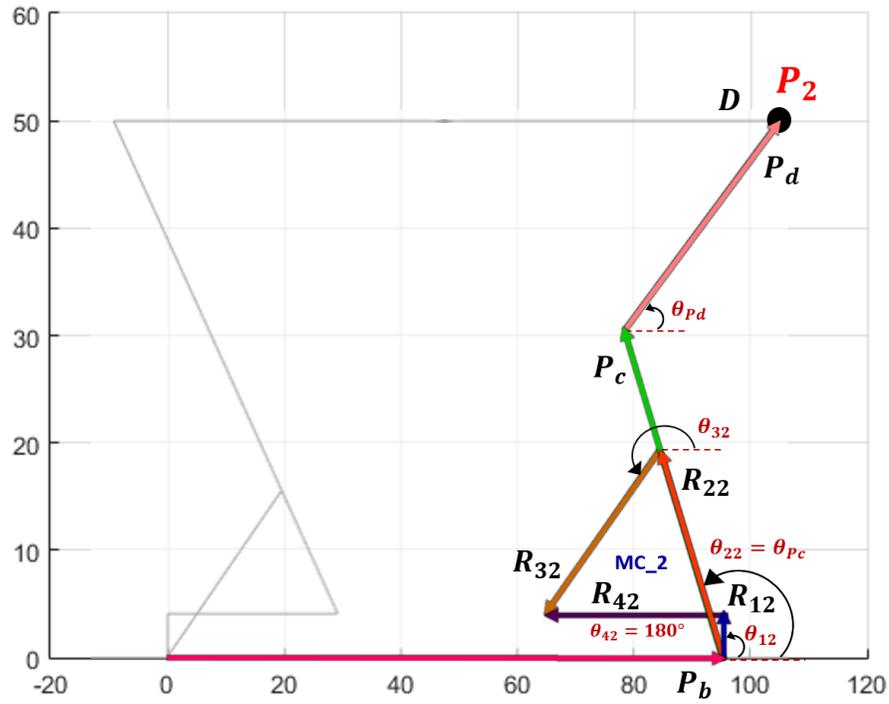


Fig. 3. 3 Mecanismo MC\_2 acoplados a los eslabones Pb, Pc y Pd.

La cinemática de la tercera parte se obtiene a partir de la formulación de ecuaciones que describen la posición de  $P_2$ . Partiendo de la posición (0,0) se puede elegir alguna de las diferentes estrategias para llegar al punto  $P_2$ , de éstas se describen 3 a continuación:

$$P_2 = r_{11} + r_{41} + P_a + D \quad (3.14)$$

$$P_2 = P_b + P_c + P_d \quad (3.15)$$

$$P_2 = P_b + r_{12} + r_{42} - r_{32} - r_{22} + P_c + P_d \quad (3.16)$$

Descomponiendo las ecuaciones anteriores por sus componentes cartesianas, obtenemos:

$$\begin{aligned} P_{2x} &= r_{41} + P_a \cos \theta_{Pa} + D \\ P_{2y} &= r_{11} + p_a \sin \theta_{Pa} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$P_{2x} = P_b + P_c \cos \theta_{22} + P_d \cos \theta_{Pd}$$

$$P_{2y} = P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} P_{2x} &= P_b - r_{42} - r_{32} \cos \theta_{32} - r_{22} \cos \theta_{22} + p_c \cos \theta_{22} + P_d \cos \theta_{Pd} \\ P_{2y} &= r_{12} - r_{32} \sin(\pi - \theta_{32}) - r_2 \sin \theta_{22} + P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Todas las partes de la ecuación 3.17 son conocidas a partir de la cinemática de MC\_1, por lo tanto, esta ecuación será la coordenada deseada de P2. Utilizando cinemática inversa y a partir del sistema de ecuaciones 3.18, 3.19 y 3.17 (punto deseado) se obtiene la cinemática del MC\_2 y del resto del mecanismo de elevación como se muestra a continuación.

Utilizando el sistema de ecuaciones 3.18 y llevando al lado izquierdo a  $\theta_{22}$  se obtiene:

$$\begin{aligned} P_c \cos \theta_{22} &= P_{2x} - P_b - P_d \cos \theta_{Pd} \\ P_c \sin \theta_{22} &= P_{2y} - P_d \sin \theta_{Pd} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Elevando al cuadrado y sumando sus términos se obtiene la ecuación de Freudenstein en forma compacta [18] (ecuación 3.21).

$$G \cos \theta_{Pd} + H \sin \theta_{Pd} + I = 0 \quad (3.21)$$

donde:

$$\begin{aligned} G &= 2(P_b P_d - P_{2x} P_d) \\ H &= -2P_{2y} P_d \\ I &= P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_b^2 + P_d^2 - P_c^2 - 2P_{2x} P_b \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $\theta_{Pd}$  está dado por la ecuación 3.22.

$$\theta_{Pd} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-H \pm \sqrt{G^2 + H^2 - I^2}}{I - G} \right) \quad (3.22)$$

Tomando en cuenta el sistema de ecuaciones 3.18, llevado a la izquierda el termino  $\theta_{Pd}$  y siguiendo los pasos anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P_d \cos \theta_{Pd} &= P_{2x} - P_b - P_c \cos \theta_{22} \\ P_d \sin \theta_{Pd} &= P_{2y} - P_c \sin \theta_{22} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$J \cos \theta_{22} + K \sin \theta_{22} + L = 0 \quad (3.24)$$

donde:

$$\begin{aligned} J &= 2(P_b P_c - P_{2x} P_c) \\ K &= -2P_{2y} P_c \\ L &= P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_b^2 + P_c^2 - P_d^2 - 2P_{2x} P_b \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $\theta_{22}$  está dado por la ecuación 3.25.

$$\theta_{22} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-K \pm \sqrt{J^2 + K^2 - L^2}}{L - J} \right) \quad (3.25)$$

Para obtener los ángulos  $\theta_{32}$  y  $r_{42}$  se utiliza el sistema de ecuaciones 3.19 y se separa como dos ecuaciones independientes, quedando:

$$P_{2x} = P_b - r_{42} - r_{32} \cos \theta_{32} - r_{22} \cos \theta_{22} + p_c \cos \theta_{22} + P_d \cos \theta_{Pd} \quad (3.26)$$

$$P_{2y} = r_{12} - r_{32} \sin(\pi - \theta_{32}) - r_2 \sin \theta_{22} + P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd} \quad (3.27)$$

Utilizando la ecuación 3.27 se obtiene el ángulo  $\theta_{32}$  como se observa en la ecuación 3.28

$$\theta_{32} = -\sin^{-1} \left( \frac{r_{12} - P_{2y} - r_{22} \sin \theta_{22} + P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd}}{r_{32}} \right) \quad (3.28)$$

Posteriormente  $r_{42}$  se obtiene a partir de la ecuación 3.26, quedando:

$$r_{42} = P_b - P_{2x} - r_{32} \cos \theta_{32} + \cos \theta_{22} (P_c - r_{22}) + P_d \cos \theta_{Pd} \quad (3.29)$$

### 3.1 Cálculo de fuerzas

El objetivo de este trabajo es la minimización del error de seguimiento de trayectoria mientras se restringen las fuerzas ejercidas en los actuadores por medio de la selección óptima de sus eslabones, siguiendo una trayectoria deseada. Para determinar las fuerzas internas en los actuadores  $F_1$  y  $F_2$ , se consideró la figura 3.4.

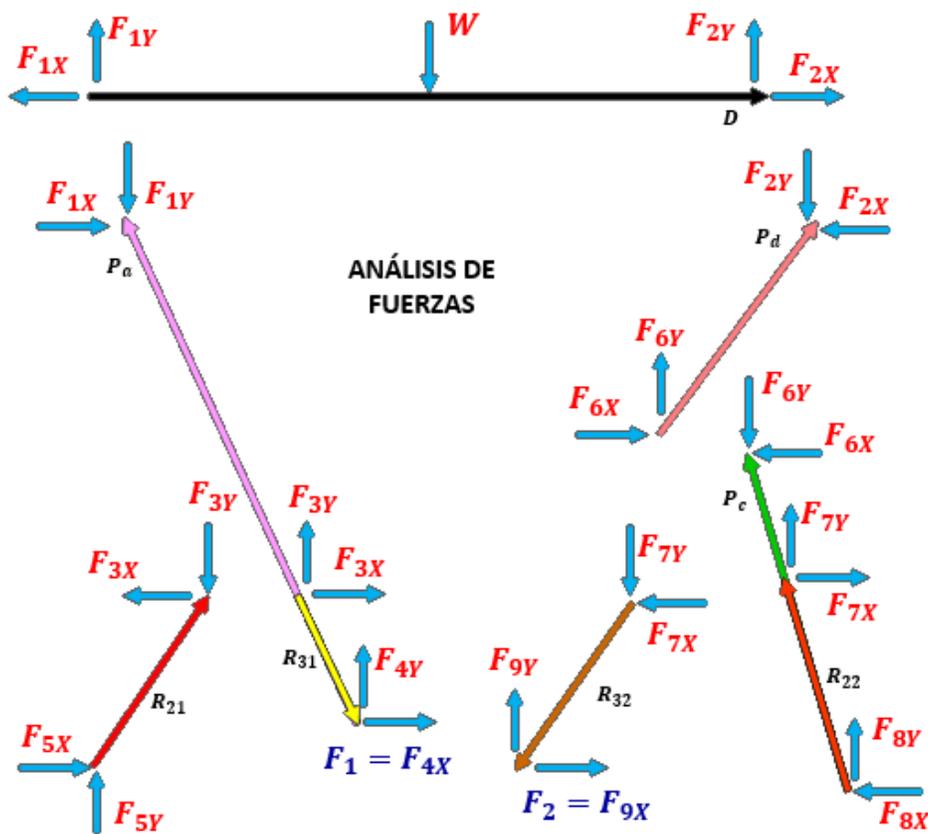


Fig. 3. 4 Análisis de fuerzas.

A partir de la figura 3.4, considerando un sistema inercial de mano derecha como referencia, se pueden plantear las ecuaciones para determinar las fuerzas internas del mecanismo.

**Para el eslabón  $D$ :**

$$-F_{1X} + F_{2X} = 0 \quad (3.30)$$

$$F_{1Y} + F_{2Y} = W \quad (3.31)$$

$$\frac{WD}{2} + DF_{2Y} = 0 \quad (3.32)$$

**Para el eslabón  $P_a$ :**

$$F_{3X} + F_{4X} = 0 \quad (3.33)$$

$$F_{3Y} + F_{4Y} = 0 \quad (3.34)$$

$$F_{1X}P_a \sin(\theta_{Pa}) - F_{1Y}P_a \cos(\theta_{Pa}) - F_{3X}R_{31} \sin(\theta_{Pa}) - F_{3Y}R_{31} \cos(\theta_{Pa}) = 0 \quad (3.35)$$

**Para el eslabón  $R_{21}$ :**

$$-F_{3X} + F_{5X} = 0 \quad (3.36)$$

$$-F_{3Y} + F_{5Y} = 0 \quad (3.37)$$

$$F_{3X}R_{21} \sin(\theta_{21}) - F_{3Y}R_{21} \cos(\theta_{21}) = 0 \quad (3.38)$$

**Para el eslabón  $P_d$ :**

$$-F_{2X} + F_{6X} = 0 \quad (3.39)$$

$$-F_{2Y} + F_{6Y} = 0 \quad (3.40)$$

$$F_{2X}P_d \sin(\theta_{Pd}) - F_{2Y}P_d \cos(\theta_{Pd}) = 0 \quad (3.41)$$

**Para el eslabón  $P_c$ :**

$$-F_{6X} + F_{7X} - F_{8X} = 0 \quad (3.42)$$

$$-F_{6Y} + F_{7Y} + F_{8Y} = 0 \quad (3.43)$$

$$F_{6X}P_c \sin(\theta_{22}) + F_{6Y}P_c \cos(\theta_{22}) - F_{7X}R_{22} \sin(\theta_{22}) - F_{7Y}R_{22} \cos(\theta_{22}) = 0 \quad (3.44)$$

Para el eslabón  $R_{32}$ :

$$-F_{7X} + F_{9X} = 0 \quad (3.45)$$

$$-F_{7Y} + F_{9Y} = 0 \quad (3.46)$$

$$F_{7X}R_{32} \sin(\theta_{32}) - F_{7Y}R_{32} \cos(\theta_{32}) = 0 \quad (3.47)$$

De las ecuaciones anteriores se puede obtener las fuerzas internas del mecanismo, de donde se identifica claramente que la fuerza  $F_{4X}$  corresponde a la fuerza del actuador 1 ( $F_1 = F_{4X}$ ) y que la fuerza  $F_{9X}$  corresponde a la fuerza del actuador 2 ( $F_2 = F_{9X}$ ).

Se concluye entonces que la cinemática del mecanismo en general influye en el cálculo de las fuerzas de los actuadores 1 y 2, en los eslabones  $R_{41}$  y  $R_{42}$ , respectivamente. Al resolver analíticamente las ecuaciones para ( $F_1 = F_{4X}$ ) y ( $F_2 = F_{9X}$ ).

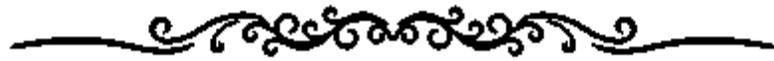
$$F_1 = \frac{W(r_{31} \cos \theta_{21} \sin \theta_{Pa} \sin \theta_{Pd} + r_{31} \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21} \sin \theta_{Pd} + P_a \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21} \sin \theta_{Pd} + P_a \cos \theta_{Pd} \sin \theta_{21} \sin \theta_{Pa})}{2(r_{31} \cos \theta_{21} \sin \theta_{Pa} \sin \theta_{Pd} + r_{31} \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21} \sin \theta_{Pd})} + \frac{W(P_a \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21} + r_{31} \cos \theta_{21} \sin \theta_{Pa} + r_{31} \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21})}{r_{31} \cos \theta_{21} \sin \theta_{Pa} + r_{31} \cos \theta_{Pa} \sin \theta_{21}} \quad (3.48)$$

$$F_2 = \frac{-(W \cos \theta_{32}(P_c \cos \theta_{22} \sin \theta_{Pd} + P_c \cos \theta_{Pd} \sin \theta_{22}))}{2(r_{22} \cos \theta_{32} \sin \theta_{22} \sin \theta_{Pd} + r_{22} \sin \theta_{22} \sin \theta_{32} \sin \theta_{Pd})} \quad (3.49)$$

Estas fuerzas se usan como restricciones en el problema de optimización planteado en este trabajo.

## Resumen del capítulo

En este capítulo se presenta el diseño del modelo cinemático del mecanismo de elevación, este se divide en dos secciones, la primera refiere a la formulación de la cinemática del mecanismo MC\_1 y de los eslabones involucrados en esa parte, la segunda sección involucra al mecanismo MC\_2 y al resto de los eslabones del mecanismo de elevación. Por último, se presenta el cálculo de fuerzas en los puntos de interés (eslabones  $r_{41}$  y  $r_{42}$ ).



# *Capítulo 4*



# Optimización con algoritmos evolutivos

La computación evolutiva es un área de las ciencias computacionales, que se enfoca al estudio de una serie de metaheurísticas estocásticas conocidas como: “**Algoritmos Evolutivos**”. Los algoritmos evolutivos son técnicas de optimización que trabajan sobre poblaciones de soluciones y que están diseñadas para buscar valores óptimos en espacios complejos. Están basados en procesos biológicos que se pueden apreciar en la naturaleza, como la selección natural [19] o la herencia genética [20]. Parte de la evolución está determinada por la selección natural de individuos diferentes compitiendo por recursos en su entorno. Por tanto, algunos individuos son mejores que otros y es deseable que aquellos individuos que son mejores sobrevivan y propaguen su material genético.

El funcionamiento de un algoritmo evolutivo (figura 4.1), procede de forma iterativa mediante la evolución de los individuos pertenecientes a la población actual. Esta evolución es normalmente consecuencia de la aplicación de operadores estocásticos de variación sobre la población, como la selección, recombinación y mutación, con el fin de calcular una generación completa de nuevos individuos. A cada individuo se le asigna un valor representativo a su aptitud para el problema dado mediante la evaluación de una función objetivo [21].

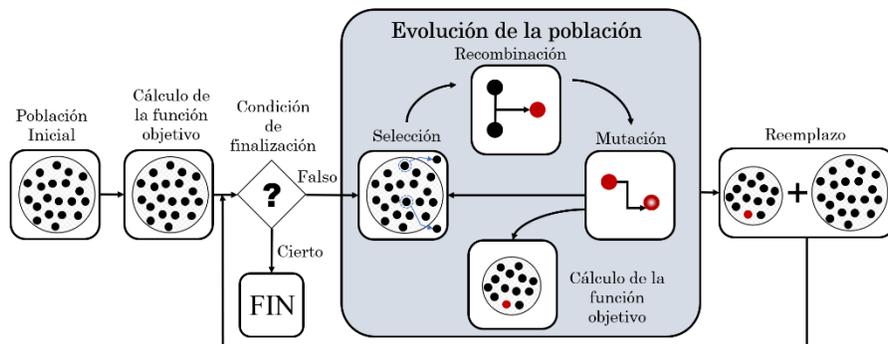


Fig. 4. 1 Funcionamiento de un Algoritmo evolutivo.

Como se ha dicho ya con anterioridad, los algoritmos evolutivos trabajan sobre poblaciones de individuos que son potenciales soluciones al problema, esta población es creada principalmente de manera aleatoria, para posteriormente evaluar a cada individuo con la función objetivo entrando así a un bucle reproductor. Este bucle consiste en la generación de una nueva población mediante la selección de los padres a cruzar, la recombinación de éstos, y la mutación de los descendientes obtenidos, tras lo que son evaluados. Esta nueva población generada por el bucle reproductor ( $P'$ ) se utilizará, junto con la población actual ( $P$ ), para obtener la nueva población de individuos de la siguiente generación. El algoritmo devolverá la mejor solución encontrada durante la ejecución y de no ser así el proceso se repetirá un número finito de veces y después terminará [21]. El funcionamiento del algoritmo evolutivo explicado anteriormente se presenta en pseudocódigo en la tabla 4.1.

**Tabla 4. 1** Pseudocódigo de un Algoritmo Evolutivo [21].

- 
1.  $P \leftarrow \text{Generar Población Inicial}()$ ;
  2.  $\text{Evaluar}(P)$ ;
  3. **mientras** !  $\text{Condición Parada}()$  **hacer**
  4.      $P' \leftarrow \text{Seleccionar padres}(P)$ ;
  5.      $P' \leftarrow \text{Operador de variación}(P')$ ;
  6.      $\text{Evaluar}(P')$ ;
  7.      $P \leftarrow \text{Seleccionar nueva población}(P, P')$ ;
  8. **fin mientras**
  9. **Resultados:** La mejor solución encontrada
- 

Dentro de los algoritmos evolutivos, se engloban diferentes estrategias para la resolución de problemas de optimización, se mencionan las siguientes:

- **Procesos de búsqueda evolutiva:** Fue propuesta por Alan Turing en el año 1948 [22].
- **Estrategias evolutivas (EE):** Propuesto por Rechenbeg en 1964. Representan a los individuos con vectores reales [22].
- **Programación evolutiva (PE):** Propuesto por Fogel en 1965. Utilizan máquinas de estado finito [22].

- **Algoritmos genéticos (AG):** Propuesto por Holland en 1975. Representan a los individuos como cadenas binarias [22].
- **Programación genética (PG):** Propuesto por Koza en 1992. Utilizan arboles LISP [22].

La diferencia que hay entre los diferentes tipos de algoritmos evolutivos, es la forma en que se representan a los individuos de una población, sin embargo, la diferencia es irrelevante ya que conceptualmente hacen lo mismo.

## 4.1 Algoritmos genéticos

Los AG son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto [23].

Para dar solución a un problema se parte de un conjunto inicial de individuos, llamado población, generado aleatoriamente. Cada uno de estos individuos representan una posible solución al problema. Estos individuos evolucionarán tomando como base los esquemas propuestos por Darwin sobre la selección natural, y se adaptarán en mayor medida tras el paso de cada generación a la solución requerida [24].

### 4.1.1 Codificación de problemas

Cualquier solución potencial a un problema puede ser presentada dando valores a una serie de parámetros. El conjunto de todos los parámetros (genes en la terminología de Algoritmos Genéticos) se codifica en una cadena de valores denominada cromosoma (figura 4.2).

El conjunto de los parámetros representado por un cromosoma particular recibe el nombre de genotipo. El genotipo contiene la información necesaria para la construcción del organismo, es decir, la solución real al problema, denominada fenotipo. Por ejemplo, en

términos biológicos, la información genética contenida en el ADN de un individuo sería el genotipo, mientras que la expresión de ese ADN (el propio individuo) sería el fenotipo. Desde los primeros trabajos de John Holland la codificación suele hacerse mediante valores binarios. Se asigna un determinado número de bits a cada parámetro y se realiza una discretización de la variable representada por cada gen. El número de bits asignados dependerá del grado de ajuste que se desee alcanzar. Evidentemente no todos los parámetros tienen por qué estar codificados con el mismo número de bits. Cada uno de los bits pertenecientes a un gen suele recibir el nombre de alelo [24]. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de un individuo binario que codifica 3 parámetros.

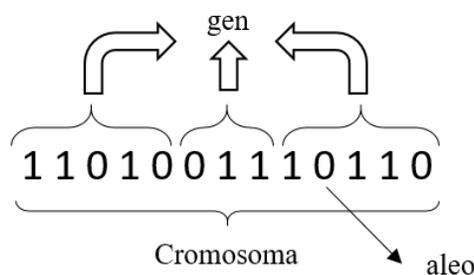


Fig. 4. 2 Individuo genético binario.

Sin embargo, también existen representaciones que codifican directamente cada parámetro con un valor entero, real o en punto flotante. A pesar de que se acusa a estas representaciones de degradar el paralelismo implícito de las representaciones binarias, permiten el desarrollo de operadores genéticos más específicos al campo de aplicación del Algoritmo Genético. Una vez codificado el problema en uno o varios cromosomas se define una función objetivo para distinguir las mejores soluciones de las peores y así comenzar a evolucionar la población de soluciones al problema dado siguiendo los siguientes pasos:

1. **Inicialización:** La población inicial de soluciones candidatas se genera usualmente de forma uniformemente aleatoria, aunque se puede incorporar fácilmente conocimiento del problema u otro tipo de información en esta fase [21].
2. **Evaluación:** Una vez que se ha inicializado la población, o creado una nueva solución descendiente, es necesario calcular el valor de adecuación (función objetivo) de las soluciones candidatas [21].

3. **Selección:** Mediante la selección se trata de dar preferencia en la evolución a aquellas soluciones con un mayor valor objetivo, imponiéndose así un mecanismo que permite la supervivencia de los mejores individuos. La principal idea de la selección consiste en preferir las mejores soluciones frente a las peores, y existen muchos procedimientos de selección propuestos para cumplir con esta idea [25, 26, 27].
4. **Recombinación:** La recombinación intercala partes de dos o más soluciones padres para crear nuevas soluciones (descendientes), que son posiblemente mejores. Existen muchas formas de conseguir esto, y un rendimiento competente del algoritmo depende de un mecanismo de recombinación bien diseñado. Idealmente, la solución descendiente que se obtiene de la recombinación no será idéntica a ninguno de los padres, sino que contendrá información combinada de los dos [21].
5. **Mutación:** Mientras la recombinación opera sobre dos o más cromosomas padres, la mutación modifica una única solución de forma aleatoria. De nuevo, existen multitud de variantes de mutaciones, que usualmente afectan a uno o más rasgos del individuo. En otras palabras, la mutación realiza un cambio aleatorio en la vecindad de una solución candidata [21].
6. **Reemplazo:** La población descendiente creada mediante la selección, recombinación y mutación reemplaza a la población de padres siguiendo algún criterio determinado, como por ejemplo el reemplazo elitista, que preserva la mejor solución a lo largo de la evolución [21].

En la tabla 4.2, se presenta el pseudocódigo de un AG, en el que se aprecia tras la generación y evaluación de la población inicial, los operadores genéticos (selección de los padres, su recombinación, mutación del (los) descendiente(s) y el reemplazo del individuo actual por un descendiente) son aplicados a cada uno de los individuos dentro del entorno de sus vecindarios iterativamente hasta que se alcanza la condición de terminación.

Tabla 4. 2 Pseudocódigo de un AG [21].

---

```

1. fun Evolucionaria (AG) // Parámetros del algoritmo en “GA”
2.  Generar Población Inicial(AG.pobl);
3.  Evaluación(AG.pobl);
4.  para s ← 1 hasta MAX_PASOS hacer
5.    para x ← 1 hasta AG.ANCHO hacer
6.      para y ← 1 hasta AG.ALTO hacer
7.        vecinos ← Calcula Vecindario(AG, posición(x, y));
8.        padres ← Selección(vecinos);
9.        descendiente ← Recombinación(AG.Pc, padres);
10.       descendiente ← Mutación(AG.Pm, descendiente);
11.       Evaluación(descendiente);
12.       Reemplazo(posición(x, y), pobl_auxiliar, descendiente);
13.     fin para
14.   fin para
15.   AG.pobl ← pobl_auxiliar;
16. fin para
17. fin fun Evolucionaria

```

---

## 4.2 Problema de optimización

Estar frente a un problema de optimización es buscar minimizar o maximizar el valor de una variable. El óptimo es el punto donde la curva es plana. En términos matemáticos, esto corresponde al valor de  $x$  donde la derivada  $f'(x)$  es igual a cero. Además, la segunda derivada,  $f''(x)$ , indica si el óptimo es un mínimo o un máximo: si  $f''(x) < 0$ , el punto es un máximo; si  $f''(x) > 0$ , el punto es un mínimo, en la figura 4.3 se describe gráficamente lo dicho anteriormente.

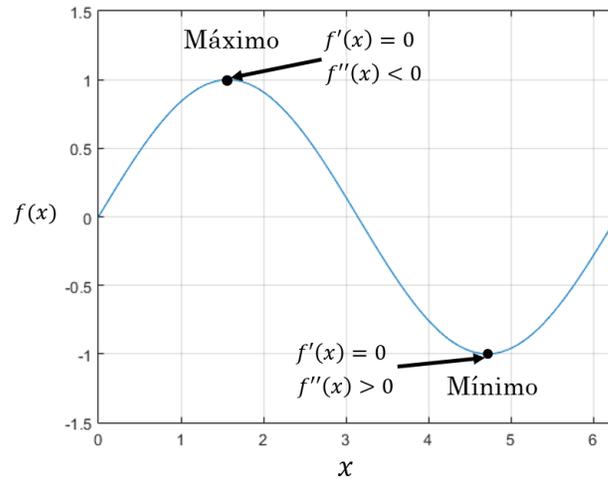


Fig. 4. 3 Descripción grafica de la definición de máximo y mínimo.

La optimización tiene que ver con la determinación del “mejor resultado”, o solución óptima, de un problema, por lo tanto, un problema de programación matemática u optimización [28], generalmente se puede establecer como:

Determine  $x$ , que minimiza o maximiza  $f(x)$

Sujeto a:

$$g_i(x) \leq a_i \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{4.1}$$

$$h_i(x) = b_i \quad i = 1, 2, \dots, p \tag{4.2}$$

Con

$$x_{min} < x < x_{max} \quad \in \mathbb{R}^q \tag{4.3}$$

donde:

$x$  es un vector de diseño n-dimensional.

$f(x)$  es la función objetivo.

$g_i(x)$  son las restricciones de desigualdad.

$h_i(x)$  son las restricciones de igualdad.

$a_i$  y  $b_i$  son constantes.

$x_{min}$  y  $x_{max}$  son cotas del vector de diseño  $x$ .

Los problemas de optimización se clasifican considerando la forma de  $f(x)$ .

- Si  $f(x)$  y las restricciones son lineales, se tiene un problema de programación lineal.
- Si  $f(x)$  es cuadrática y las restricciones son lineales, se tiene un problema de programación cuadrática.
- Si  $f(x)$  no es lineal ni cuadrática y/o las restricciones no son lineales, se tiene un problema de programación no lineal.

Cuando no se incluyen las ecuaciones 4.1 y 4.2 en un problema de optimización, se dice que se tiene un problema de optimización no restringido.

## 4.3 Planteamiento del problema de optimización del mecanismo de elevación

Una vez definido el problema de optimización numérico general y con base en la definición de un algoritmo genético referida en la subsección 4.2, se plantea el problema de síntesis del mecanismo de elevación de la CamaBot como un problema de optimización numérica [28], en donde la función objetivo, las variables de diseño y las restricciones son detalladas a continuación.

### 4.3.1 Función objetivo

Se establece como función objetivo la ecuación 4.4, donde  $(x_{sis}(i), Y_{sis}(i))$  son las coordenadas  $x$ ,  $y$  de la trayectoria del sistema,  $(P_{1x}(i), P_{1y}(i))$ , son las coordenadas de la trayectoria del punto  $P$  del mecanismo de elevación (trayectoria de referencia),  $N$  es la última posición de la cama y  $e$  es el error cuadrático.

$$e = \sum_{i=1}^{N=21} \left[ (x_{sis}(i) - P_{1x}(i))^2 + (Y_{sis}(i) - P_{1y}(i))^2 \right] \quad (4.4)$$

### 4.3.2 Vector de variable de diseño

Se establece el vector de diseño  $x_c$ , donde las variables de diseño  $r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{12}, r_{22}, r_{32}, P_a, P_c, P_d$ , son longitudes de los eslabones del mecanismo de elevación y  $r_{41\_min}$  es un valor arbitrario para la configuración de la distancia del eslabón  $r_{41}$ .

$$x_c = [r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{12}, r_{22}, r_{32}, P_a, P_c, P_d, r_{41\_min}] \quad (4.5)$$

### 4.3.3 Restricciones

Se establece como restricciones de desigualdad las siguientes ecuaciones:

$$P_{1y} \leq 9 \quad (4.6)$$

$$F_1 \leq 11000 \quad (4.7)$$

$$F_1 \leq 11000 \quad (4.8)$$

Donde la ecuación 4.6 es una restricción para que no se exceda la altura mínima de la CamaBot, la ecuación 4.7 y 4.8 son las restricciones para el límite de las fuerzas de los eslabones  $r_{41}$  y  $r_{42}$ , donde se establece que no debe exceder de 11000 N.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el objetivo de este trabajo es restringir las fuerzas ejercidas por la cama en los puntos de apoyo de los actuadores por medio de una

selección óptima de los eslabones utilizando algoritmos genéticos como técnica de optimización, dicho lo anterior, en este trabajo no se plantea un problema de seguimiento de trayectoria, sin embargo, se tomó como referencia la trayectoria producida por el punto  $P_1$  en un desplazamiento de 21 puntos desde una altura máxima hasta una altura mínima del mecanismo de elevación original como trayectoria deseada como se muestra en la figura 4.4, las coordenadas de los 21 puntos se describen en la tabla 4.3.

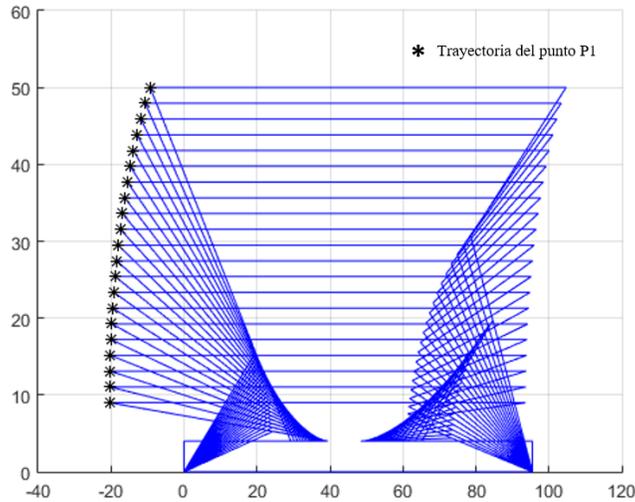


Fig. 4. 4 Trayectoria del mecanismo de elevación.

Tabla 4. 3 Coordenadas de la trayectoria deseada.

$P_{1x}$	-9.277	-10.625	-11.827	-12.904	-13.873	-14.748	-15.538	-16.251	-16.893	-17.471	-17.988
→	-18.448	-18.855	-19.210	-19.516	-19.774	-19.987	-20.155	-20.280	-20.361	-20.401	
$P_{1y}$	50	47.95	45.9	43.85	41.8	39.75	37.7	35.65	33.6	31.55	29.5
→	27.45	25.4	23.35	21.3	19.25	17.2	15.15	13.1	11.05	9	

### 4.3.4 Problema de optimización del mecanismo de elevación

Con base en lo descrito en la sección anterior, se describe en la ecuación 4.9 el problema de optimización para el mecanismo de elevación, donde se minimiza la función objetivo (ecuación 4.4).

$$\min f(x_c) = \sum_{i=1}^{N=21} \left[ (x_{sis}(i) - P_{1x}(i))^2 + (Y_{sis}(i) - P_{1y}(i))^2 \right] \quad (4.9)$$

Sujeto a:

$$g_1: -P_{1y} + 9 \leq 0 \quad (4.10)$$

$$g_2: F_1 - 11000 \leq 0 \quad (4.11)$$

$$g_2: F_1 - 11000 \leq 0 \quad (4.12)$$

Con

$$x_{cmin} < x_c < x_{cmax} \quad (4.13)$$

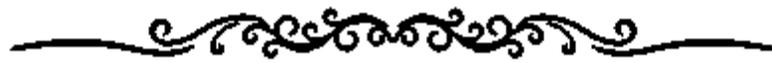
Las cotas para el vector de diseño se describen en la tabla 4.4.

**Tabla 4. 4** Cotas del vector de diseño.

Vector de diseño	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4min}$
$x_{cmax}$	5	30	20	5	30	25	70	40	30	35
$x_{cmin}$	3	20	10	3	20	20	50	30	25	15

## Resumen del capítulo

En este capítulo se presenta una pequeña descripción de lo que son los algoritmos evolutivos, las diferentes estrategias que se pueden encontrar, se describe su funcionamiento y se presenta su pseudocódigo, de igual forma se tiene la descripción de los algoritmos genéticos (tipo de algoritmo evolutivo seleccionado en este trabajo), se presenta el problema de optimización general y se describen las partes matemáticas que lo conforman, por último se establece el planteamiento del problema de optimización del mecanismo de elevación de la Camabot.



# *Capítulo 5*



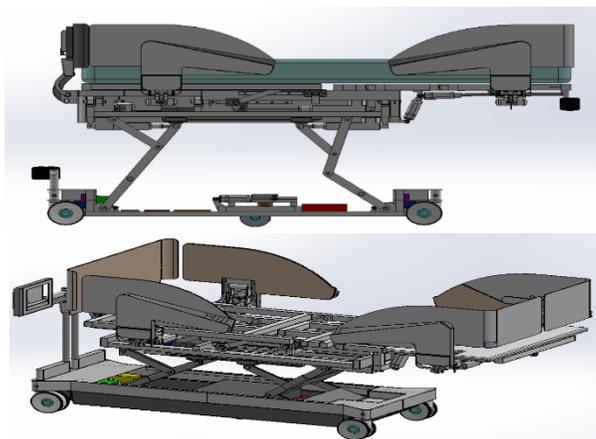
# Simulación

Del problema de optimización planteado en el capítulo anterior, se presenta la simulación del mecanismo de elevación, utilizando el Toolbox de algoritmos genéticos de Matlab® [30].

Para este punto del trabajo de tesis, se ha calculado la cinemática del mecanismo de elevación, se planteó el problema de síntesis (cinemática) como un problema de optimización numérica, seleccionando las partes matemáticas que lo conforman como: el vector de diseño, la función objetivo, restricciones y espacio de búsqueda (cotas).

El primer paso que se realizó fue obtener la trayectoria original que realiza el mecanismo de elevación, este se obtuvo del CAD de la cama original (figura 5.1) trabajando únicamente con la parte de interés (mecanismo de elevación, figura 5.2).

El mecanismo de elevación debe cumplir con ciertas posiciones para que la cama llegue a la altura establecida, el rango del mecanismo oscila de los 9 – 50 cm. Y se tomaron 21 posiciones  $(x, y)$  para describir su trayectoria, se muestra en la tabla 5.1.



**Fig. 5. 1** CAD final de la CamaBot.

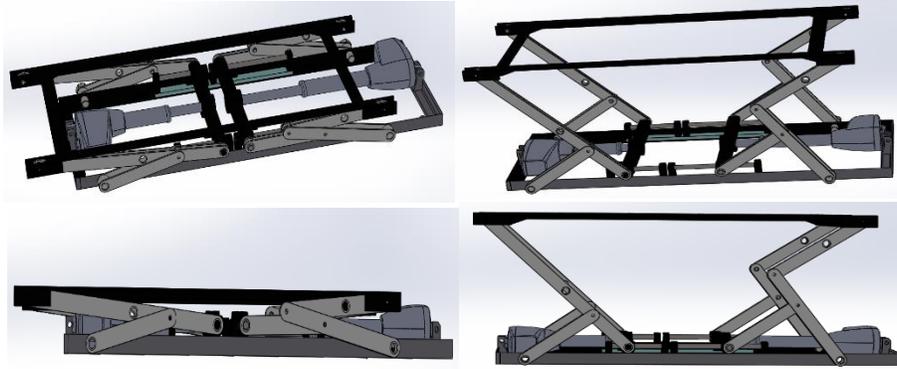


Fig. 5. 2 Mecanismo de elevación en diferentes posiciones.

Tabla 5. 1 Trayectoria original del mecanismo de elevación.

$P1x$	$P1y$				
1) -9.277	50	8) -16.251	35.65	15) -19.516	21.3
2) -10.625	47.95	9) -16.893	33.6	16) -19.774	19.25
3) -11.827	45.9	10) -17.471	31.55	17) -19.987	17.2
4) -12.904	43.85	11) -17.988	29.5	18) -20.155	15.15
5) -13.873	41.8	12) -18.448	27.45	18) -20.280	13.1
6) -14.748	39.75	13) -18.855	25.4	20) -20.361	11.05
7) -15.538	37.7	14) -19.210	23.35	21) -20.401	9

Utilizando los valores de la tabla 5.1 y las dimensiones de los eslabones actuales con sus fuerzas del mecanismo de elevación de la tabla 5.2 se realizó la simulación del mecanismo de elevación en el programa de Matlab®, dando como resultado la figura 5.3.

Tabla 5. 2 Valores actuales del mecanismo de elevación.

$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_1$	$F_2$
4	25	15.021	4	22.5	25.013	60.010	35	32.502	29.2613	26667N	11549N

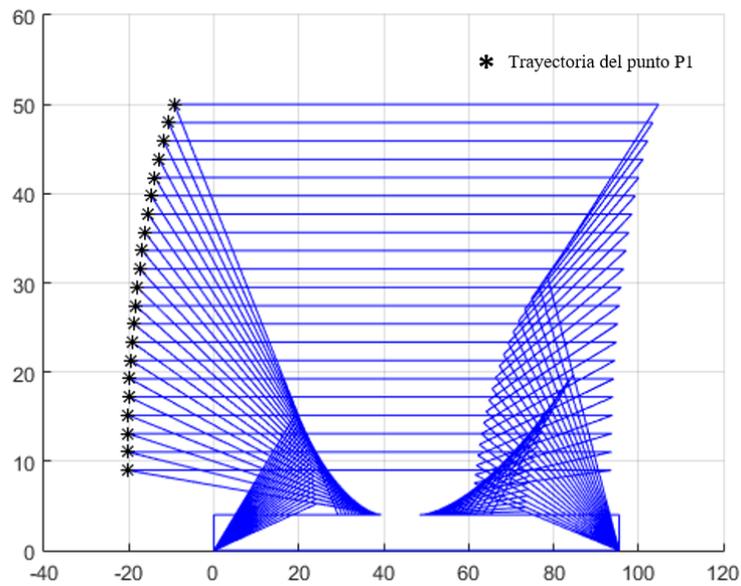


Fig. 5. 3 Diagrama vectorial de la trayectoria del mecanismo de elevación.

En la tabla 5.2 se presentan los valores de las dimensiones actuales y las fuerzas ejercidas en los puntos de apoyo de los actuadores del mecanismo de elevación, utilizados en la simulación de la trayectoria como se presentó en la figura 5.3.

Como segundo paso se implementó las ecuaciones del capítulo 4 (ecuaciones 4.9 – 4.13) en el programa de Matlab® junto con el Toolbox de algoritmos genéticos. El problema que aborda la función objetivo es un problema de seguimiento de trayectoria, sin embargo, el objetivo se enfoca en verificar los valores obtenidos por las fuerzas F1 y F2.

Se creó un programa con una función de error cuadrática, donde se comparan los resultados de la trayectoria del mecanismo de elevación obtenidos por AG, contra la trayectoria actual del mecanismo de elevación (tabla 5.1), esta ecuación es nuestra función objetivo y se presenta en la ecuación 5.1.

$$e = \sum_{i=1}^{N=21} \left[ (x_{sis}(i) - P_{1x}(i))^2 + (Y_{sis}(i) - P_{1y}(i))^2 \right] \quad (5.1)$$

Para el primer resultado utilizando AG se realizó un total de 10 simulaciones, seleccionando únicamente el mecanismo con menor fuerza generada en los eslabones  $r_{41}$  y  $r_{42}$  ( $F_1$  y  $F_2$ ), para estas primeras pruebas la restricción para la fuerza consistía en obtener mecanismos que cumplieran con fuerzas menores a 11000 N como se muestra en las ecuaciones 5.3 y 5.4, además se incluye una restricción para la altura mínima del mecanismo de elevación (ecuación 5.2). El resultado de las 10 simulaciones se presenta en la tabla 5.3 y se remarca con color rojo el mejor resultado, de igual forma, en la figura 5.4 se presenta la simulación del mejor resultado encontrado con el AG para el diseño del mecanismo de elevación de los resultados de la tabla 5.3.

$$P_{1y} \leq 9 \tag{5.2}$$

$$F_1 \leq 11000 \tag{5.3}$$

$$F_2 \leq 11000 \tag{5.4}$$

**Tabla 5. 3** Resultados de las primeras 10 simulaciones.

#de corrida	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_1$	$F_2$
1	4.7938	22.3546	18.5008	3.0062	29.9999	20.0026	57.1296	31.9721	29.8835	28.5130	10999.752	7999.983
2	3.3192	21.1739	18.7201	3.0029	29.9999	20.0566	57.6050	32.6645	29.9357	27.8022	10999.798	7999.599
3	3.8292	20.6195	17.7509	3.0329	29.9994	20.0366	54.8557	30.6694	29.1502	26.3653	10999.083	7999.664
4	3.9525	20.2502	17.7719	3.0040	29.9996	20.0111	55.7787	32.6342	29.6832	25.8066	10999.418	7996.680
5	3.5361	20.2406	18.1832	3.0017	29.9975	20.0029	56.1547	32.6884	29.9763	26.2814	10970.024	7993.098
6	4.7979	21.7429	18.1365	3.0010	30.0000	20.0072	56.5299	31.9140	29.4846	27.5342	10999.991	7999.949
7	3.9166	20.0930	17.3988	3.0206	30.0000	20.0084	55.0800	32.6845	29.9982	25.2980	10997.550	7994.223
8	4.6918	20.4549	16.9870	3.0007	29.9997	20.0237	54.3943	32.1017	29.6268	25.1174	10999.407	7999.898
9	4.5249	20.9178	17.8960	3.0085	29.9999	20.0028	55.9787	32.6230	29.9043	26.4577	10999.113	7999.878
10	3.2065	21.0076	18.5565	3.0017	29.9998	20.0092	56.8052	31.7016	29.5851	27.5867	10999.809	7999.952

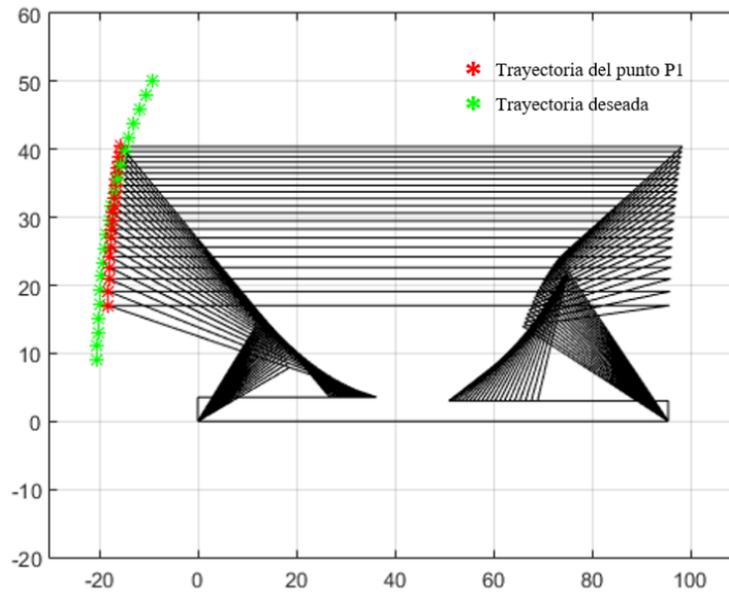


Fig. 5. 4 Diagrama vectorial de la mejor simulación (simulación 5).

En la figura 5.4 se presenta la propuesta del diseño del mecanismo de elevación obtenido con el programa de optimización utilizando AG (los puntos verdes corresponden a la trayectoria original del mecanismo de elevación y los puntos rojos corresponden a la trayectoria realizada por el mecanismo obtenido con el AG), en otras palabras, se presenta la mejor simulación de las primeras 10 simulaciones de la tabla 5.3

Los valores de la trayectoria dibujada por el mecanismo obtenido por el AG (puntos rojos de la figura 5.4) se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5. 4 Trayectoria del mecanismo de la simulación 5.

$P_x$	$P_y$				
1) -15.5926	40.4117	8) -16.6211	34.7025	15) -17.5950	26.9966
2) -15.73925	39.6841	9) -16.7662	33.7505	16) -17.7209	25.6402
3) -15.886	38.9299	10) -16.9100	32.7565	17) -17.8411	24.1919
4) -16.0336	38.1478	11) -17.0522	31.7166	18) -17.9541	22.6354
5) -16.1810	37.3360	12) -17.1923	30.6265	18) -18.0580	20.9483
6) -16.3282	36.4926	13) -17.3299	29.4810	20) -18.1499	19.0988
7) -16.4750	35.6156	14) -17.4643	28.2736	21) -18.2258	17.0388

El resultado de la simulación de la figura 5.4, muestra un mecanismo que cumple con dos de las restricciones establecidas (ver resultados de la tabla 5.3, fila color rojo, columnas con indicadores  $F_1$  y  $F_2$ ), pero sigue sin ser un diseño factible debido a que no satisface del todo las restricciones planteadas, para obtener otro tipo de resultado, se optó por modificar los valores de las restricciones de fuerzas y los valores de las cotas, las nuevas restricciones de fuerza se presentan en las ecuaciones 5.5 y 5.6 (la restricción de altura mínima se mantiene), y los valores de las nuevas cotas se presentan en la tabla 5.5.

$$F_1 \leq 8000 \tag{5.5}$$

$$F_1 \leq 8000 \tag{5.6}$$

**Tabla 5. 5** Nuevas cotas del vector de diseño.

Vector de diseño	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4 \min}$
$x_{c \max}$	5	30	20	5	30	35	70	40	38	35
$x_{c \min}$	4	25	15	4	22	25	60	35	32	29

Con la modificación de las restricciones de fuerzas (ecuaciones 5.5 y 5.6) y con la variación de los valores de las cotas (tabla 5.5) en el programa de optimización (programa de Matlab®), se obtuvo una nueva propuesta para el diseño del mecanismo de elevación, el resultado de la simulación se presenta en la figura 5.5, donde los puntos verdes siguen siendo la trayectoria original del mecanismo de elevación y los puntos rojos son la trayectoria realizada por el mecanismo obtenido por el AG.

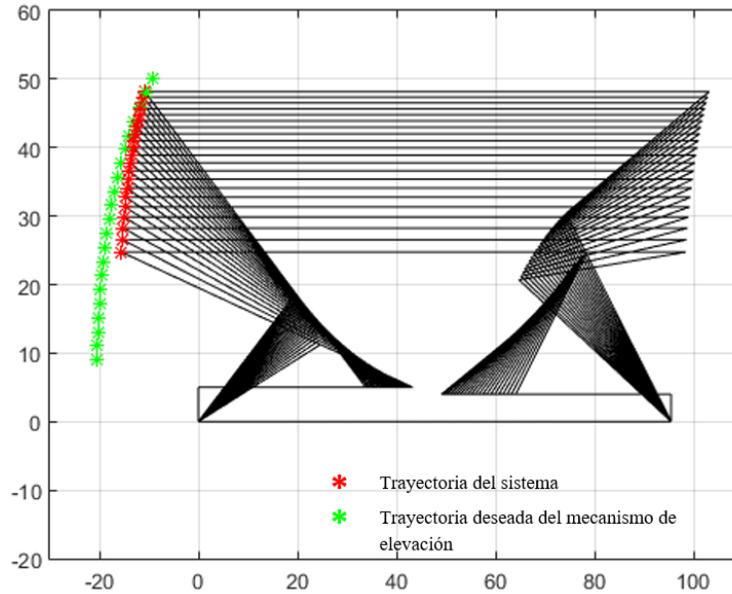


Fig. 5.5 Mecanismo obtenido de los programas modificados.

Los valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  obtenidos por el AG del mecanismo de la figura 5.5 se presentan en la tabla 5.6. y en la tabla 5.7 se muestra la trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.5 (puntos rojos).

Tabla 5.6 Valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  del mecanismo de la figura 5.5.

$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4 \min}$	$F_1$	$F_2$
5	27.1190	19.6804	4.0001	29.9999	25	62.0876	37.0671	33.9457	33.3304	7985.4N	7998.6N

Tabla 5.7 Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.5.

$P_x$	$P_y$				
1) -10.8265	48.1596	8) -12.7047	42.0187	15) -14.3712	34.1025
2) -11.1062	47.3640	9) -12.9571	41.0169	16) -14.5868	32.7596
3) -11.3821	46.5435	10) -13.2052	39.9776	17) -14.7952	31.3455
4) -11.6544	45.6969	11) -13.4487	38.8981	18) -14.9954	29.8509
5) -11.9228	44.8228	12) -13.6874	37.7749	18) -15.1865	28.2636
6) -12.1874	43.9195	13) -13.9209	36.6044	20) -15.3668	26.5682
7) -12.4481	42.9855	14) -14.1490	35.3820	21) -15.5342	24.7438

El resultado mostrado en la figura 5.5, muestra un mecanismo más parecido al mecanismo de elevación original y comparando los resultados de la tabla 5.3 fila color rojo con la tabla 5.6, se observa que hubo una disminución en las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$ , sin embargo, la coordenada ( $y$ ) aumento en consideración del mecanismo de la figura 5.4 (mecanismo anterior).

Para el siguiente resultado mostrado en la figura 5.7, se hizo una modificación en la distancia del eslabón  $P_b$  (figura 5.6) de  $P_b = 95.5$  a  $P_b = 115$  y se cambió la trayectoria del mecanismo original (tabla 5.1) a una combinación de coordenadas, es decir, se tomó la coordenada  $P_x$  de la tabla 5.7 (mecanismo de la figura 5.5) y la coordenada  $P_y$  de la tabla 5.1 (mecanismo original), ésta se utilizó como trayectoria de referencia y se muestra en la tabla 5.8.

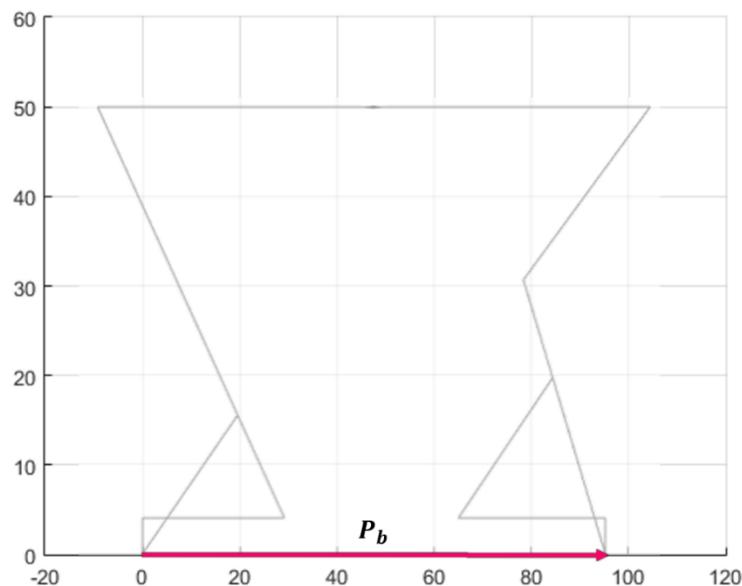


Fig. 5. 6 Eslabón  $P_b$  del mecanismo de elevación.

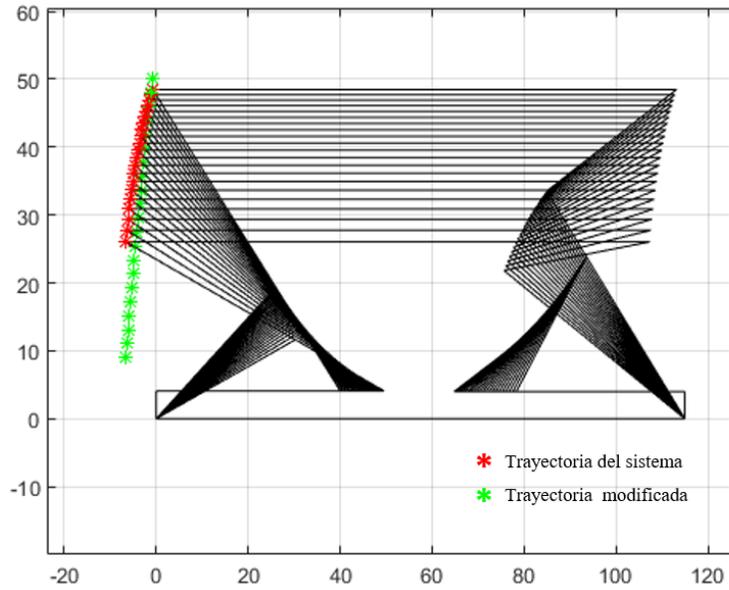


Fig. 5. 7 Mecanismo obtenido con la trayectoria modificada.

Tabla 5. 8 Trayectoria modificada y utilizada como trayectoria de referencia.

$P_x$	$P_y$				
1) -10.8265	50	8) -12.7047	35.65	15) -14.3712	21.3
2) -11.1062	47.95	9) -12.9571	33.6	16) -14.5868	19.25
3) -11.3821	45.9	10) -13.2052	31.55	17) -14.7952	17.2
4) -11.6544	43.85	11) -13.4487	29.5	18) -14.9954	15.15
5) -11.9228	41.8	12) -13.6874	27.45	18) -15.1865	13.1
6) -12.1874	39.75	13) -13.9209	25.4	20) -15.3668	11.05
7) -12.4481	37.7	14) -14.1490	23.35	21) -15.5342	9

Los valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  obtenidos por el AG del mecanismo de la figura 5.7 se presentan en la tabla 5.9. y en la tabla 5.10 se muestra la trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.7 (puntos rojos).

Tabla 5. 9 Valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  del mecanismo de la figura 5.7.

$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_1$	$F_2$
4.0861	32.4088	20.7318	4.0000	32.0000	25.0000	60.2970	44.9996	32.0222	39.5590	7743.2N	7992.5N

**Tabla 5. 10** Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.7.

$P_x$	$P_y$				
1) -0.7813	48.4680	8) -3.0745	42.5409	15) -5.1092	34.9300
2) -1.1247	47.7000	9) -3.3814	41.5752	16) -5.3767	33.6449
3) -1.4627	46.9079	10) -3.6830	40.5739	17) -5.6376	32.2944
4) -1.7955	46.0905	11) -3.9793	39.5345	18) -5.8914	30.8700
5) -2.1230	45.2466	12) -4.2703	38.4542	18) -6.1373	29.3613
6) -2.4453	44.3748	13) -4.5557	37.3294	20) -6.3745	27.7549
7) -2.7625	43.4735	14) -4.8354	36.1563	21) -6.6018	26.0335

El resultado mostrado en la figura 5.7, muestra un mecanismo un tanto diferente al mecanismo original de la CamaBot en cuanto a dimensiones. La simulación de este mecanismo no se tomó como mejor resultado dado que la variación en la altura de este nuevo resultado comparada con el anterior no era tan relevante para tomarla en cuenta, por lo tanto, se realizó otra simulación regresado el valor del eslabón  $P_b = 115$  a  $P_b = 95.5$ , de igual forma se cambió la trayectoria de referencia tomando la coordenada  $P_x$  de la tabla 5.10 y manteniendo la coordenada  $P_y$  del mecanismo original, la nueva trayectoria se muestra en la tabla 5.11.

**Tabla 5. 11** Nueva trayectoria modificada y utilizada como trayectoria de referencia.

$P_x$	$P_y$				
1) -0.7813	50	8) -3.0745	35.65	15) -5.1092	21.3
2) -1.1247	47.95	9) -3.3814	33.6	16) -5.3767	19.25
3) -1.4627	45.9	10) -3.6830	31.55	17) -5.6376	17.2
4) -1.7955	43.85	11) -3.9793	29.5	18) -5.8914	15.15
5) -2.1230	41.8	12) -4.2703	27.45	18) -6.1373	13.1
6) -2.4453	39.75	13) -4.5557	25.4	20) -6.3745	11.05
7) -2.7625	37.7	14) -4.8354	23.35	21) -6.6018	9

El mecanismo obtenido con las nuevas modificaciones (modificación en la trayectoria de referencia y cambio en el eslabón  $P_b$ ) se muestra en la figura 5.8.

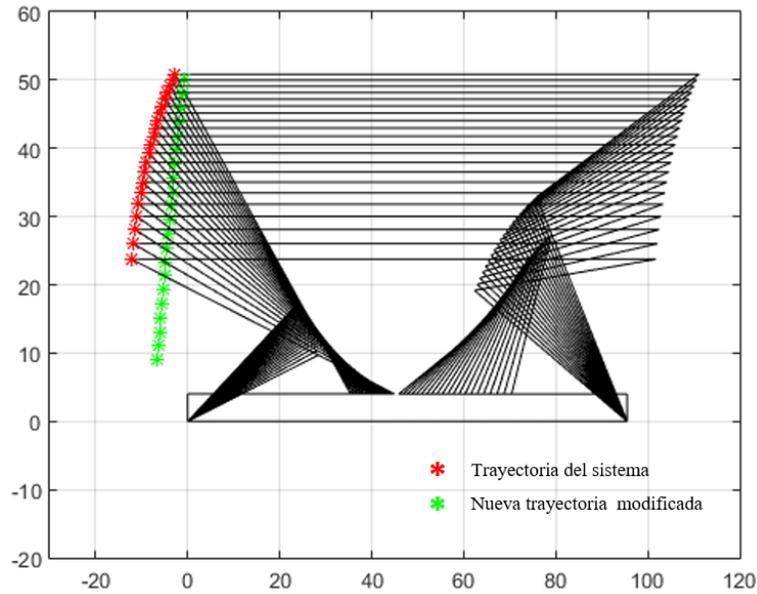


Fig. 5. 8 Mecanismo obtenido con la nueva trayectoria modificada.

Los valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  obtenidos por el AG del mecanismo de la figura 5.8 se presentan en la tabla 5.12. y en la tabla 5.13 se muestra la trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.8 (puntos rojos).

Tabla 5. 12 Valores del vector de diseño y de las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$  del mecanismo de la figura 5.8.

$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4 \text{ min}}$	$F_1$	$F_2$
4.0146	30.0063	17.4697	4.0018	31.9997	25.0027	60.4443	38.2883	39.6707	34.9017	6991.8N	7997.3N

**Tabla 5. 13** Trayectoria producida por el mecanismo de la figura 5.8.

$P_x$	$P_y$				
1) -2.8241	50.8560	8) -6.5364	44.0916	15) -9.8278	35.0431
2) -3.3807	49.9944	9) -7.0327	42.9660	16) -10.2606	33.4703
3) -3.9283	49.1007	10) -7.5205	41.7925	17) -10.6824	31.8002
4) -4.4671	48.1735	11) -7.9998	40.5671	18) -11.0921	30.0173
5) -4.9971	47.2110	12) -8.4705	39.2854	18) -11.4884	28.1013
6) -5.5187	46.2114	13) -8.9322	37.9420	20) -11.8690	26.0244
7) -6.0317	45.1724	14) -9.3848	36.5304	21) -12.2310	23.7467

Como se puede observar en la figura 5.8 en comparación con el primer resultado (figura 5.4) obtenido por el AG, se tiene un mecanismo donde empieza en una altura de 50.8560 cm y una altura mínima de 23.7467 cm, en cambio el mecanismo de la figura 5.4 empieza con una altura de 40.4117 cm y termina con una altura mínima de 17.0388, ese factor de alturas hace que se tome como el mejor resultado de todas las simulaciones realizadas, ya que las fuerzas obtenidas para el mecanismo mencionado (mecanismo de la figura 5.8) son menores a todas las fuerzas obtenidas de las simulaciones anteriores. La razón con la que se concluye con estos valores es debido a que bajo las condiciones con las que se trabaja (restricciones), los valores convergían siempre a la altura mínima de 23 cm aproximadamente.

## Resumen del capítulo

En este capítulo se presenta la simulación del mecanismo de elevación, empezando con la simulación del mecanismo original y seguido de la simulación de la trayectoria del mecanismo en su forma vectorial. Se utilizaron ecuaciones del capítulo 4 y se implementaron usando algoritmos genéticos, de igual forma se presentan las simulaciones obtenidas en el proceso de optimización con AG y las modificaciones que se realizaron para llegar al resultado final.



# *Capítulo 6*



# Análisis de resultados, conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de esta tesis se ha estudiado las estrategias para resolver el problema de minimización de las fuerzas ejercidas por la cama en los puntos de apoyo de los actuadores para satisfacer las restricciones establecidas, planteando el diseño del mecanismo de elevación y posteriormente introduciendo los métodos de optimización con algoritmos evolutivos (en específico con algoritmos genéticos). La ventaja de utilizar un método de optimización con algoritmos genéticos, es la convergencia de una función sin el uso de derivadas, estos generan una población de puntos en cada iteración y el mejor punto de la población es el que converge a la solución óptima, en cambio, un algoritmo clásico genera un único punto en cada iteración y la secuencia de puntos es la que se aproxima a una solución óptima, estos son seleccionados mediante cálculos determinísticos, cosa contraria a los AG que utiliza cálculos probabilísticos [35, 36].

## Análisis de resultados

En el capítulo anterior, se describió la simulación del mecanismo de elevación original y se estructuró el código de optimización en la plataforma de Matlab® con el Toolbox de algoritmos genéticos utilizando las ecuaciones planteadas del capítulo 3 y 4 (cinemática del mecanismo de elevación, función objetivo, restricciones, cotas y cosas más particulares de los algoritmos genéticos como: número de variables de diseño, número de población, entre otras cosas), se obtuvo las simulaciones de los diseños propuestos por el AG para el mecanismo de elevación y se seleccionó el último diseño bajo las condiciones planteadas anteriormente (restricciones). Se indica que es el mejor resultado obtenido dado a la

comparación de fuerza, altura mínima, similitud del mecanismo original de Camabot contra el diseño del mecanismo obtenido por el algoritmo genético

En la tabla 6.1 se presentan los resultados de los vectores de diseño y sus fuerzas correspondientes de cada propuesta de diseño obtenida por el AG, siendo los indicadores del cuadro azul las variables que conforman el vector de diseño y los cuadros amarillos los indicadores de las variables de fuerza, en la columna con título “Número de mecanismo” se enumeran los resultados de los mecanismos obtenidos en el capítulo anterior. Los resultados son colocados de esta forma para una fácil visualización y comparación de uno con el otro, los valores del mecanismo #1 corresponden a los valores originales del mecanismo de elevación y posteriormente, los demás números corresponden a los mecanismos obtenidos por el AG, de igual forma, se presenta en la tabla 6.2 las trayectorias de todos los diseños propuestos por el AG, siendo el #1 la trayectoria original del mecanismo de elevación.

**Tabla 6. 1** Vectores de diseño y fuerzas de todos los mecanismos obtenidos por los AG.

Número de mecanismo	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_1$	$F_2$
#1	4	25	15.021	4	22.5	25.013	60.010	35	32.502	29.2613	26667N	11549N
#2	3.5361	20.2406	18.1832	3.0017	29.9975	20.0029	56.1547	32.6884	29.9763	26.2814	10970.024	7993.098
#3	5	27.1190	19.6804	4.0001	29.9999	25	62.0876	37.0671	33.9457	33.3304	7985.4N	7998.6N
#4	4.0861	32.4088	20.7318	4.0000	32.0000	25.0000	60.2970	44.9996	32.0222	39.5590	7743.2N	7992.5N
#5	4.0146	30.0063	17.4697	4.0018	31.9997	25.0027	60.4443	38.2883	39.6707	34.9017	6991.8N	7997.3N

En la tabla 6.1 se puede observar los resultados de cada vector de diseño y las fuerzas de cada mecanismo propuesto por el AG, comparando cada mecanismo con el #1 (mecanismo original) se llega a la conclusión de que el mecanismo #5, es el mecanismo con menor fuerza en  $F_1$ , aunque no para  $F_2$  como el mecanismo #4, sin embargo se toma otro factor en cuenta para concluir que el mecanismo #5 es el mejor resultado obtenido, este factor es la altura mínima que alcanzo cada mecanismo propuesto por el AG.

Tabla 6. 2 Trayectoria de todos los mecanismos obtenidos por los AG.

Número de mecanismo									
#1		#2		#3		#4		#5	
$P1x$	$P1y$	$Px$	$Py$	$Px$	$Py$	$Px$	$Py$	$Px$	$Py$
-9.277	50	-15.5926	40.4117	-10.8265	48.1596	-0.7813	48.4680	-2.8241	50.8560
-10.625	47.95	-15.7392	39.6841	-11.1062	47.3640	-1.1247	47.7000	-3.3807	49.9944
-11.827	45.9	-15.886	38.9299	-11.3821	46.5435	-1.4627	46.9079	-3.9283	49.1007
-12.904	43.85	-16.0336	38.1478	-11.6544	45.6969	-1.7955	46.0905	-4.4671	48.1735
-13.873	41.8	-16.1810	37.3360	-11.9228	44.8228	-2.1230	45.2466	-4.9971	47.2110
-14.748	39.75	-16.3282	36.4926	-12.1874	43.9195	-2.4453	44.3748	-5.5187	46.2114
-15.538	37.7	-16.4750	35.6156	-12.4481	42.9855	-2.7625	43.4735	-6.0317	45.1724
-16.251	35.65	-16.6211	34.7025	-12.7047	42.0187	-3.0745	42.5409	-6.5364	44.0916
-16.893	33.6	-16.7662	33.7505	-12.9571	41.0169	-3.3814	41.5752	-7.0327	42.9660
-17.471	31.55	-16.9100	32.7565	-13.2052	39.9776	-3.6830	40.5739	-7.5205	41.7925
-17.988	29.5	-17.0522	31.7166	-13.4487	38.8981	-3.9793	39.5345	-7.9998	40.5671
-18.448	27.45	-17.1923	30.6265	-13.6874	37.7749	-4.2703	38.4542	-8.4705	39.2854
-18.855	25.4	-17.3299	29.4810	-13.9209	36.6044	-4.5557	37.3294	-8.9322	37.9420
-19.210	23.35	-17.4643	28.2736	-14.1490	35.3820	-4.8354	36.1563	-9.3848	36.5304
-19.516	21.3	-17.5950	26.9966	-14.3712	34.1025	-5.1092	34.9300	-9.8278	35.0431
-19.774	19.25	-17.7209	25.6402	-14.5868	32.7596	-5.3767	33.6449	-10.2606	33.4703
-19.987	17.2	-17.8411	24.1919	-14.7952	31.3455	-5.6376	32.2944	-10.6824	31.8002
-20.155	15.15	-17.9541	22.6354	-14.9954	29.8509	-5.8914	30.8700	-11.0921	30.0173
-20.280	13.1	-18.0580	20.9483	-15.1865	28.2636	-6.1373	29.3613	-11.4884	28.1013
-20.361	11.05	-18.1499	19.0988	-15.3668	26.5682	-6.3745	27.7549	-11.8690	26.0244
-20.401	9	-18.2258	17.0388	-15.5342	24.7438	-6.6018	26.0335	-12.2310	23.7467

Como se mencionó anteriormente, el factor para determinar cuál mecanismo obtuvo el mejor resultado es la altura mínima, en la tabla 6.2 se presentan los resultados de las trayectorias de todos los mecanismos obtenidos por el AG, excepto el mecanismo #1 que corresponde a la trayectoria original del mecanismo de elevación. Comparando la coordenada ( $y$ ) de cada mecanismo obtenido por el AG con la coordenada ( $y$ ) del mecanismo original, se llega a la conclusión del que el mecanismo #5 es el más cercano a la altura máxima y mínima del mecanismo original.

De los 4 mecanismos seleccionados después de diversas pruebas, se tomó el mecanismo #5 como el mejor mecanismo encontrado por el AG, la decisión se tomó comparando los

resultados de las fuerzas y la trayectoria en la coordenada (y) de cada mecanismo, la simulación del resultado del mecanismo #5 se presenta en la figura 6.1.

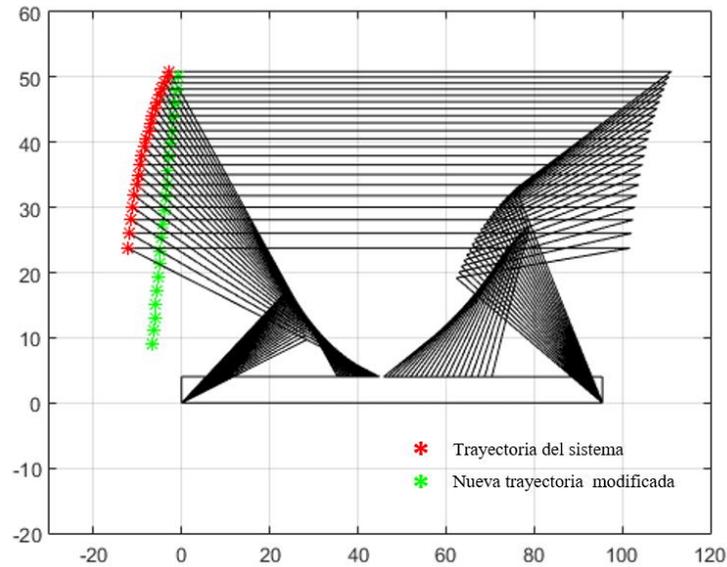


Fig. 6. 1 Mejor resultado para el diseño del mecanismo de elevación.

En la figura 6.2 se presenta la comparación del mecanismo de elevación original y el mecanismo obtenido por el AG, en la parte 6.2a se encuentra la posición más alta del mecanismo y en la parte 6.2b la posición mínima.

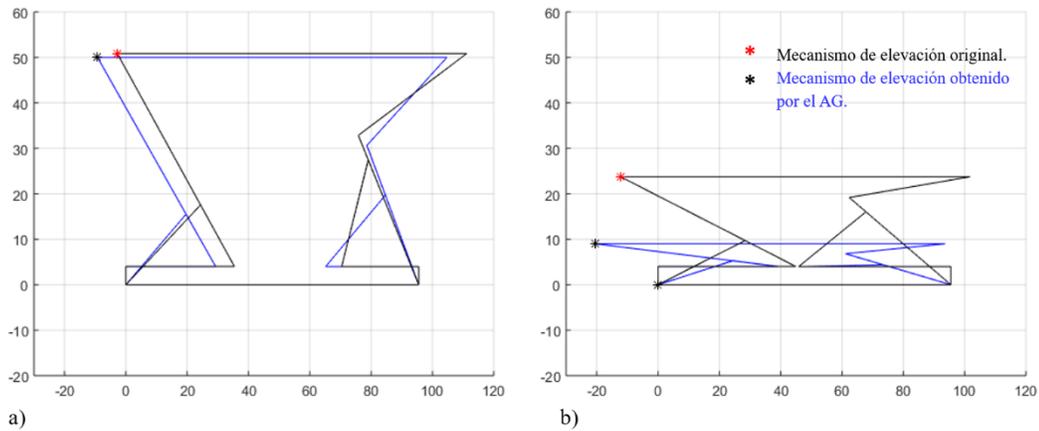


Fig. 6. 2 Comparación del mecanismo de elevación original vs obtenido por el AG (a: altura máxima, b: altura mínima).

Como se observa en la figura 6.2, se presentó la comparación del mecanismo original (dibujo vectorial de color negro con asterisco de color rojo) y el diseño del mecanismo obtenido por el AG (dibujo vectorial de color azul con asterisco de color negro), desde la altura máxima a la altura mínima establecida por los diseñadores de Camabot.

La altura mínima original del mecanismo de elevación es de 9 cm, y la altura mínima obtenida por el AG es de 23.7467 cm, aunque la altura del mecanismo obtenido por el AG no cumple con el requisito de altura mínima establecida por los diseñadores de CamaBot, si se realiza el análisis de fuerza a la altura aproximada de 23.7467 cm (altura del mecanismo obtenido por el AG) en el mecanismo original se tendrá que el cálculo de la fuerza en los puntos de apoyo de los actuadores exceden a los valores de fuerzas, para un entendimiento visual se toma en cuenta la figura 6.2 y para la comprensión numérica se detalla en la tabla 6.4.

Para realizar el análisis de fuerza a la altura aproximada de 23.7467 cm se verifico las 21 coordenadas establecidas para la trayectoria del mecanismo original, esto con fin practico para la realización de los cálculos del análisis de fuerza. De los 21 valores, la coordenada (y) de la posición 14 es la que más se aproxima al valor de 23.7467 cm.. El valor de la coordenada (y) del mecanismo original se resalta con rojo en la tabla 6.3.

**Tabla 6. 3** Trayectoria original del mecanismo de elevación.

<i>P1x</i>	<i>P1y</i>				
1) -9.277	50	8) -16.251	35.65	15) -19.516	21.3
2) -10.625	47.95	9) -16.893	33.6	16) -19.774	19.25
3) -11.827	45.9	10) -17.471	31.55	17) -19.987	17.2
4) -12.904	43.85	11) -17.988	29.5	18) -20.155	15.15
5) -13.873	41.8	12) -18.448	27.45	18) -20.280	13.1
6) -14.748	39.75	13) -18.855	25.4	20) -20.361	11.05
7) -15.538	37.7	14) -19.210	23.35	21) -20.401	9

**Tabla 6. 4** Comparación de las fuerzas del mecanismo original vs el mecanismo obtenido por el AG a distintas alturas.

<b>Coordenada (y) del mecanismo original</b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>F_2</math></b>
9 cm	26667 N	11549 N
23.35 cm	11834 N	2034.5 N
<b>Coordenada (y) del mecanismo obtenido por el AG</b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>F_2</math></b>
23.7467 cm	6991.8N	7997.3N

Como se observa en la tabla 6.4, las fuerzas en el mecanismo original a una altura de 9 cm son de:  $F_1 = 26,667 N$  y  $F_2 = 11,549 N$ , la altura de 9 cm corresponde a la posición 21 que describe la trayectoria del mecanismo original, ahora bien las fuerzas del mecanismo #5 obtenidas con el AG son de:  $F_1 = 6,991 N$  y  $F_2 = 7,997 N$  respectivamente, la altura mínima que obtuvo el AG fue de 23.7467 cm y esta altura corresponde a la posición 21, dicho lo anterior si se calculan las fuerzas a una altura aproximada a la altura obtenida por el AG (altura de 23.7467) que para el caso del mecanismo original corresponde a la posición 14 con una altura de 23.35 cm las fuerzas a esa altura son:  $F_1 = 11,834 N$  y  $F_2 = 2,034.5 N$ , que si se comparan con las obtenidas por el AG son menores relativamente ya que ambas fuerzas están distribuidas al valor propuesto (8,000 N).

## Conclusiones

Los AG son técnicas de optimización y búsqueda basados en los principios de la selección natural y la supervivencia del más fuerte. La ventaja que nos brindan los AG implica un gran número de posibilidades como manipular grandes cantidades de parámetros, usar operadores probabilísticos en lugar de operadores determinísticos, no necesitar información a priori del problema, entre otras, esto nos ayuda en la resolución de problemas con un grado de dificultad alta por la gran cantidad de información que hay que procesar.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo de tesis, la problemática se sitúa en la sección de elevación de la CamaBot y para dar solución al problema planteado se propuso aplicar una técnica de optimización utilizando algoritmos genéticos para optimizar dicha sección por medio de la selección óptima de sus eslabones para restringir la fuerza ejercida en los puntos de apoyo de los actuadores.

Se planteó a partir del capítulo 3 la cinemática del mecanismo de elevación, en el capítulo 4 se presenta el problema de optimización seguido de las partes matemáticas involucradas, en el capítulo 5 se presentan las simulaciones de los resultados previos al resultado final y por último en el capítulo 6 se presenta los resultados finales donde se obtiene un mecanismo parecido al mecanismo original, el cual cumple con la restricción de fuerzas mínimas y aunque no cumpla con la restricción de altura mínima, se puede decir que el mecanismo de elevación obtenido con los algoritmos genéticos es mejor al original respecto a la condición de fuerza y respecto a que la fuerza sigue siendo menor comparándola a la altura de 23.35 cm del mecanismo original.

## Trabajo a futuro

La realización de este trabajo de tesis concluyó con la obtención de una propuesta de diseño para el mecanismo de elevación de la CamaBot utilizando como técnica de optimización AG, para un trabajo a futuro se exploraría obtener una nueva configuración para el mecanismo de elevación, proponiendo más eslabones en la configuración o cambiando el ángulo de la posición de los actuadores, para posteriormente hacer el estudio del nuevo diseño cinemático y realizar todos los pasos tratados a lo largo de esta tesis, de igual forma el diseño obtenido deberá ser probado en una etapa de manufactura para hacer físicamente evidente que proporciona mejores resultados que el diseño mecánico actualmente implementado en Camabot.

El presente estudio reveló que es necesario considerar actuadores con más potencia y capacidad de fuerza, para continuar con el mecanismo actualmente implementado en la CamaBot. Sin embargo, esta tesis no representa aún un estudio exhaustivo y por lo tanto, se requieren propuestas alternativas al problema de optimización planteado, ya que la metodología del problema condiciona la solución de los resultados, tal como se reporta en [29].

El trabajo en general es parte de un esfuerzo integral con el objetivo de impulsar el uso de dispositivos como Camabot en el contexto de la salud. En este sentido, la cama robótica asistencial forma parte de los esfuerzos que se realizan en México para potencializar la innovación tecnológica en beneficio de la sociedad mexicana.

## Referencias

- [1] Vázquez Santacruz, Eduardo, et al. Mechatronic Approach to an Intelligent Machine: the Case of an Assistive Device. *Research in Computing Science*, 2015, vol. 100, p. 115-127.
- [2] Holland, John Henry. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.
- [3] Goldberg, David E.; HOLLAND, John H. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 1988, vol. 3, no 2, p. 95-99.
- [4] Lagrange, JL (1882). *Obras de Lagrange* (Vol. 13). Gauthier-Villars.
- [5] Euler, L. (1953). Leonhard Euler y los puentes de Königsberg. *Scientific American*, 189 (1), 66-72.
- [6] Albers, D. J., & Reid, C. (1986). An interview with George B. Dantzig: The father of linear programming. *The college mathematics journal*, 17(4), 292-314.
- [7] Pedersen, P. (1972). On the optimal layout of multi-purpose trusses. *Computers & Structures*, 2(5-6), 695-712. [8] Ramírez, H. S., Márquez, R., Echeverría, F. R., y Santiago, O. L. (2005). *Control de Sistemas no Lineales*. México: Pearson - Prentice Hall.
- [8] Reinschmidt, K. F., & Russell, A. D. (1974). Applications of linear programming in structural layout and optimization. *Computers & Structures*, 4(4), 855-869.
- [9] Lipson, S. L., & Gwin, L. B. (1977). The complex method applied to optimal truss configuration. *Computers & Structures*, 7(3), 461-468.
- [10] Jenkis, W. M. On the application of natural algorithms to structural design optimization. *Engineering structures*. 1997, vol. 19, no 4, p. 302-308.
- [11] Annicchiarico, W.; Cerrolaza, M. Optimization of finite element bidimensional models: an approach based on genetic algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design*, 1998, vol. 29, no 3-4, p. 231-257.

- [12] Coello, C. A.; Christiansen, Alan D. Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms. *Computers & Structures*, 2000, vol. 75, no 6, p. 647-660.
- [13] Deb, Kalyanmoy; Gulati, Surendra. Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms. *Finite elements in analysis and design*, 2001, vol. 37, no 5, p. 447-465.
- [14] Ortiz, A., Cabrera, J. A., Nadal, F., & Bonilla, A. (2013). Dimensional synthesis of mechanisms using Differential Evolution with auto-adaptive control parameters. *Mechanism and Machine Theory*, 64, 210-229.
- [15] Pantoja-García, J. S., Villarreal-Cervantes, M. G., González-Robles, J. C., & Cervantes, G. S. (2017). Síntesis óptima de un mecanismo para la marcha bípeda utilizando evolución diferencial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 33(1-2), 138-153.
- [16] Kittipichai, Rung; Ariyarit, Atthaphon. The sizing optimization of hospital bed structure for independently supporting left and or right leg using genetic algorithms. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2011, vol. 1, no 2, p. 122.
- [17] Moreno, R. P. (2006). *Análisis de mecanismos y problemas resueltos*. Alfaomega.
- [18] Shigley, J. E., Uicker, J. J., Pérez, J. H., & de Contín, H. C. (1983). *Teoría de máquinas y mecanismos* (No. TJ145. S54 1983.). México; McGraw-Hill.
- [19] Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection Or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. H. Milford; Oxford University Press.
- [20] Mendel, G. (1901). *Versuche über Pflanzenhybriden: Zwei abhandlungen.(1865 und 1869.)* (No. 121). W. Engelmann.
- [21] Díaz, B. D. (2007). *Diseño e implementación de algoritmos genéticos celulares para problemas complejos* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Universidad de Málaga).
- [22] Coello, C. A. C., & Zacatenco, C. S. P. (2004). Introducción a la computación evolutiva. *México*.
- [23] Fogel, D. B. (2000). What is evolutionary computation?. *IEEE spectrum*, 37(2), 26-32.

- [24] Marcos; Rivero Gestal (Daniel; Rabuñal, Juan Ramón; Dorado, Julián; Pazos, Alejandro), & Gestal, M. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Universidade da Coruña.]
- [25] Collins, R. J., & Jefferson, D. R. (1991). *Selection in massively parallel genetic algorithms*. University of California (Los Angeles). Computer Science Department.
- [26] Goldberg, D. E., & Deb, K. (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In *Foundations of genetic algorithms* (Vol. 1, pp. 69-93). Elsevier.
- [27] Sarma, J., & De Jong, K. A. (1997, July). An Analysis of Local Selection Algorithms in a Spatially Structured Evolutionary Algorithm. In *ICGA* (pp. 181-187).
- [28] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill.
- [29] Ixshel Foster, Rogelio Portillo, Eduardo Vázquez. Sobre la síntesis óptima de mecanismos. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, 2019, Vol. 1, p. 100-105.
- [30] MathWorks, T. (2005). Genetic algorithm and direct search toolbox user's guide.
- [31] Deb, K. (2000). An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 186(2-4), 311-338.
- [32] Lafon, P. (1994). Conception optimale de systèmes mécaniques: Optimisation en variables mixtes. *These 3eme cycle, n d'ordre*, 273.
- [33] Giraud, L., & Lafon, P. (1999). Optimal Design of Mechanical Components with Genetic Algorithm. In *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering '98* (pp. 93-100). Springer, Dordrecht.
- [34] Marcelin, J. L. (2005). Using genetic algorithms for the optimization of mechanisms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(1-2), 2-6.
- [35] Determinación de los mínimos globales para problemas altamente no lineales. (s.f). *MathWorks®* Recuperado de <https://la.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>.
- [36] Marcelin, J. L. (1999). Evolutionary optimization of mechanical structures. *Engineering optimization*, 31(5), 571-588.



# UNACAR

Universidad Autónoma del Carmen  
"Por la Grandeza de México"

## ACUERDO PARA USO DE OBRA

**A quien corresponda**

**PRESENTE**

Por medio del presente escrito, **Ixshel Jhoselyn Foster Vázquez** (en lo sucesivo EL AUTOR) hace constar que es titular intelectual de la obra denominada, "**Análisis para el diseño óptimo de camabot**" (en lo sucesivo la OBRA), en virtud de lo cual autoriza a la Universidad Autónoma del Carmen (en lo sucesivo la UNACAR) para que efectúe resguardo físico y/o electrónico mediante copia digital o impresa para asegurar su disponibilidad, divulgación, comunicación pública, distribución, transmisión, reproducción, así como digitalización de la misma con fines académicos y sin fines de lucro como parte de Repositorio Institucional de la UNACAR (*Runacar*).

De igual manera, es deseo del AUTOR establecer que esta autorización es voluntaria y gratuita, y que de acuerdo con lo señalado en la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de Propiedad Industrial, la UNACAR cuenta con mi autorización para la utilización de la información antes señalada, estableciendo que se utilizará única y exclusivamente para los fines antes señalados. EL AUTOR autoriza a la UNACAR a utilizar las obras en los términos y condiciones aquí expresados, sin que ello implique que se le conceda licencia o autorización alguna o algún tipo de derecho distinto al mencionado respecto a la "propiedad intelectual" de la misma OBRA; incluyendo todo tipo de derechos patrimoniales sobre obras y creaciones protegidas por derechos de autor y demás formas de propiedad intelectual reconocida o que lleguen a reconocer las leyes correspondientes. Al reutilizar, reproducir, transmitir y/o distribuir la OBRA se deberá reconocer y dar crédito de autoría de la obra intelectual en los términos especificados por el propio AUTOR, y el no hacerlo implica el término de uso de esta licencia para los fines estipulados. Nada de esta licencia menoscaba o restringe los derechos patrimoniales y morales del AUTOR.

De la misma manera, se hace manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general de cualquier parte de la OBRA son responsabilidad del AUTOR, por lo que se deslinda a la UNACAR por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual, así como cualquier responsabilidad relacionada con la misma frente a terceros. Finalmente, el AUTOR manifiesta que estará depositando la versión final de su Tesis de maestría, OBRA y cuenta con los derechos morales y patrimoniales correspondientes para otorgar la presente autorización de uso.

En la ciudad de Carmen, del estado de Campeche a los 28 días el mes de noviembre de 2019.

Atentamente.

IXSHEL JHOSELYN FOSTER VÁZQUEZ

**Nombre y Firma Autógrafa de EL AUTOR**

Escriba la Facultad, Escuela, Centro a la que está suscrita la obra: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Campus III.