



DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO
DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ELECTROMECAÁNICO
CONSTRUIDO CON
HERRAMIENTAS DIDACTICO-PEDAGÓGICAS
LEGO EDUCATION
COMPATIBLES CON LA
FÁBRICA DIDÁCTICA DE LA UAN SEDE SUR.

AUTORES:

CLAUDIA ROCIO CUARTAS SARMIENTO.
CARLOS EDUARDO ARENAS ROMERO.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA.
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA. SEDÉ SUR.
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA.
2020.

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO
DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ELECTROMECHANICO
CONSTRUIDO CON
HERRAMIENTAS DIDACTICO-PEDAGÓGICAS
LEGO EDUCATION
COMPATIBLES CON LA
FÁBRICA DIDÁCTICA DE LA UAN SEDE SUR.

AUTORES:

**CLAUDIA ROCIO CUARTAS SARMIENTO.
CARLOS EDUARDO ARENAS ROMERO.**

Director TESIS

NICOLÁS GIRALDO PERALTA, I.M. M.Sc. Ph.D.

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO ELECTROMECHANICO.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA.
INGENIERÍA ELECTROMECHANICA. SEDÉ SUR.
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA.
2020.

Nota de aceptación:

Firma del jurado.

Firma del jurado.

Bogotá, Julio 22 del 2.020.

DEDICATORIA:

Al mejor ingeniero y fuente de inspiración, la persona que siempre ha creído en mí desde el principio y que sigue ahí, apoyándome constantemente, gratitud y amor total.

Y a mi compañero y amigo Carlos, por su paciencia y complicidad.

Claudia Rocío Cuartas Sarmiento

A mi hija, quien es la fuente de inspiración y el motor de marcha que me impulsa para seguir adelante siempre, a mi madre, quien ha sido la mujer que me ha hecho el hombre que soy, a toda mi familia, quienes han estado ahí siempre, aportando cada uno su grano de arena, a su manera, para el logro de los objetivos que la vida nos traza cada día. A mi compañera de proyecto y quien, sin su impulso, aporte y constancia, no podría ser realidad este logro.

Carlos Eduardo Arenas Romero

A nuestro director de tesis, **Ing. NICOLÁS GIRALDO PERALTA, I.M. M.Sc. Ph.D.** por su apoyo permanente y por compartir sus conocimientos y amplia experiencia con nosotros.

A ADTECH S.A. y sus directivas, quienes han depositado su confianza en el desarrollo educativo del país y las oportunidades que brinda la implementación de nuevas estrategias pedagógicas y herramientas educativas.

Y a quienes han sufrido por la pandemia del Covid-19 que azota al mundo en la actualidad y por la cual, el presente proyecto se convierte en parte en un sentido homenaje a todas ellas.

Equipo de trabajo Sistema Electromecánico

RESUMEN.

El presente proyecto conforma el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema electromecánico didáctico para la selección de productos generales en una línea de producción.

El prototipo está en capacidad de identificar una caja proveniente de una ubicación específica, haciendo uso de un sensor de color y un sensor ultrasónico; manipular la caja seleccionada por medio de un brazo robótico y ubicarla en un posicionamiento específico.

Una vez establecidos los parámetros de diseño del sistema electromecánico y, teniendo en cuenta los análisis dinámicos establecidos para tal fin, se procedió al diseño y construcción estructural del dispositivo.

De la misma manera, las actividades de construcción y pruebas de funcionamiento del dispositivo se realizaron haciendo uso de herramientas didáctico-pedagógicas **LEGO education**, programadas con software especializado **MindStorms EV3**, propio de la marca, para la automatización y control de dispositivos robóticos.

Las mencionadas herramientas didáctico-pedagógicas de la marca **LEGO education**, coinciden con los kits de trabajo de la “Fábrica Didáctica” de la Universidad Antonio Nariño sede sur y tienen el potencial de cubrir una alta gama de ejercicios especializados aplicables para la carrera Ingeniería Electromecánica y los fundamentos cognitivos que la caracterizan.

PALABRAS CLAVE: Ambiente de aprendizaje, Automatización industrial, Ingeniería, Innovación, Robótica industrial, Herramienta LEGO education MindStorms EV3, Brazo Robótico, Fábrica Didáctica.

ABSTRACT

This current project includes the design, construction and presents to a point the electromechanic-didactic system for the selection of general products of a line of production.

The prototype is in the capacity of identifying a prominent box from a specific location; manipulate the selected box through a robotic arm and then locating it in a specific location.

Once located, the parameters of design from the electromechanical system and keeping in mind the dynamic analysis stablished with the mentioned purpose, it was proceeded to the design and then structural construction of the dispositive.

Equally, the construction activities and evaluations of the functioning of the dispositive were done by making use of the tools didactic/pedagogic *LEGO* education programmed with the specialized software MindStomra EV3, uniquely by the brand, for the automatization and control of the robotic-dispositives.

The mentioned didactic-pedagogic tools from the *LEGO* education brand match with the working kits of the “Didactic Factory” from south headquarters of Antonio Nariño University which have the potential to cover a wide range of especialized excercises aplicable to Electromechanic engineering and its cognitive fundamentals.

KEY WORDS: Learning environment, Industrial automation, Engineering, Innovation, Industrial robotics, LEGO education MindStorms EV3 Tool, Robotic Arm, Didactic Factory.

CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	12
1.1. Objetivo General.....	12
1.2. Objetivos específicos.....	12
1.3. Antecedentes.....	13
1.4. Justificación.....	14
1.5. Metodología.....	16
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.....	17
2.1. Herramientas didáctico-pedagógicas LEGO education.....	18
2.1.1. LEGO y su historia.....	18
2.1.2. Componentes del sistema LEGO <i>Education MindStorms</i> EV3.....	21
2.1.3. Software LEGO Education MINDSTORMS.....	30
2.1.4. Aplicación LEGO Gear Calculator.....	33
2.2. Robot Manipulador Industrial.....	34
2.2.1. Estructura Mecánica de un Robot.....	35
2.2.2. Brazo Robótico.....	37
2.3. Dinámica del robot.....	39
2.3.1. Cinemática del robot.....	40
2.3.2. Cinética del Robot.....	49
2.3.3. Momento de inercia de masa.....	50
2.3.4. Motores eléctricos.....	51
2.3.5. Sistemas mecánicos de transmisión de potencia.....	53
2.4. Software de análisis matemático MATLAB.....	59
CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO.....	62
3.1. Parámetros de diseño.....	62

3.2. Morfología.....	63
3.2.1. Criterio de Grubler Kutzbach.....	63
3.2.2. Entorno de Trabajo.....	64
3.3. Descripción del proceso constructivo.....	67
3.3.1. Construcciones Previas.....	67
3.3.2. Construcción Final.....	70
CAPÍTULO 4. ANALISIS DINÁMICO DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO.	84
4.1. Análisis cinemático.	84
4.1.1. Cinemática Directa.....	85
4.1.2. Cinemática Inversa.....	93
4.1.3. Cinemática Diferencial.....	98
4.2. Análisis Cinético.....	102
CAPÍTULO 5. SISTEMA DE CONTROL.....	114
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	120
6.1. Resultados de Diseño.....	120
6.2. Resultados constructivos.....	120
6.3. Resultados de programación, control y puesta a punto.....	122
6.4. Consolidado de resultados.....	124
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.	134
CAPÍTULO 8. TRABAJO FUTURO.....	136
BIBLIOGRAFÍA.....	138
CONSULTAS EN PÁGINAS ELECTRÓNICAS.....	139
ANEXOS.....	140

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Definición de Parámetros D-H. Fuente (Propia).....	88
Tabla 2. Parámetros de diseño Efecto Final. Fuente: (Propia).	105
Tabla 3. Parámetros de diseño Eslabón 3. Fuente: (Propia).	107
Tabla 4. Parámetros de diseño Eslabón 2. Fuente: (Propia).	109
Tabla 5. Parámetros de diseño Eslabón 1, Parte 2-3. Fuente: (Propia).....	111
Tabla 6. Parámetros de diseño Eslabón 1, Parte 1. Fuente: (Propia).....	113
Tabla 7. Parámetros de Construcción. Fuente: (Propia).....	122
Tabla 8. Análisis Dinámico, parámetros de diseño. Fuente : (Propia).	125
Tabla 9. Cadena cinemática, Posición 0 - 1. Fuente: (Propia).....	127
Tabla 10. Cadena cinemática, Posición 1 - 2. Fuente: (Propia).....	128
Tabla 11. Cadena cinemática, Posición 2 - 3. Fuente: (Propia).....	129
Tabla 12. Cadena cinemática, Posición 3 - 4. Fuente: (Propia).....	130
Tabla 13. Cadena cinemática, Posición 3 - 5. Fuente: (Propia).....	131
Tabla 14. Cadena cinemática, Posición 3 - 6. Fuente: (Propia).....	132
Tabla 15. Análisis cinemático Efecto Final. Fuente: (Propia).....	133

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Diagrama de proceso metodológico. Fuente: (Propia).....	16
Figura 2. Bloque EV3. Fuente (LEGO, 2013)	21
Figura 3. Propiedades de material ABS. Fuente: (SolidWorks)	23
Figura 4. Sistema de referencia para el cálculo dimensional de ladrillos LEGO Parte 1.	24
Figura 5. Sistema de referencia para el cálculo dimensional de ladrillos LEGO Parte 2.	25
Figura 6. Aplicación cálculo dimensional de ladrillos LEGO. Fuente: (Propia)	26
Figura 7. Relación de tamaño Vigas, Ejes y Ángulos LEGO. Fuente: (3D íres, 2014).	26
Figura 8. Motores LEGO. Fuente: (LEGO, 2013).....	28
Figura 9. Software de programación MindStorms EV3. Fuente: (LEGO, 2013)....	32
Figura 10. Herramienta de ayuda Software de programación MINDSTORMS EV3 (F1). Fuente: (Propia)	33
Figura 11. LEGO Gear Calculator. Fuente: (Propia).....	34
Figura 12. Movimientos en articulaciones. Fuente. (Barrientos 2007)	36
Figura 13. Cadena Cinemática: a) abierta b) cerrada. Fuente: (Barrientos)	36
Figura 14. Tipos de Robots. Fuente: (Robótica, Irene Alvares Caro.)	38
Figura 15. Agrupación de sistemas de referencia a cada eslabón del manipulador. Fuente:(Barrientos, 2007)	42
Figura 16. Correspondencia entre cinemática directa e inversa. Fuente: (Barrientos, 2007).	42
Figura 17. Parámetros de D-H para eslabón giratorio. Fuente (Barrientos, 2007).	44
Figura 18. Jacobiana analítica directa e inversa. Fuente: (Barrientos, 2007).	49
Figura 19. Diseño interno de Motor Grande EV3. Fuente: (Propia).	52
Figura 20. Engrane LEGO, diseño en SolidWorks. Fuente: (Propia).	55
Figura 21. Tren epicicloidal simple. Fuente (Foix & Costa, 2001).....	57
Figura 22. Vista Superior Área de Trabajo. Fuente: (Propia).	65

Figura 23. Vista Isométrica área de trabajo. Fuente:(Propia).	65
Figura 24. Esquema general de Diseño. Fuente:(Propia).	66
Figura 25. Pruebas constructivas Fase inicial. Fuente: (Propia)	68
Figura 26. Pruebas constructivas Fase Intermedia. Fuente: (Propia)	69
Figura 27. Pruebas constructivas Fase final. Fuente: (Propia)	70
Figura 28. Parámetros constructivo base de giro (1- parte1) Fuente:(Propia).	71
Figura 29. Sistema de transmisión. Fuente: (Propia).	72
Figura 30. Mecanizado de ejes especiales. Fuente:(Propia).	72
Figura 31. Propiedades del material Bronce Latón. Fuente: (SolidWorks).	73
Figura 32. Ejes especiales. Fuente: (Propia).	74
Figura 33. Parámetros constructivos base acrílica. Fuente: (Propia)	75
Figura 34. Base Acrílica, construcción real. Fuente: (Propia).	75
Figura 35. Parámetros constructivos eslabón (1 -parte 2). Fuente:(Propia).	76
Figura 36. Parámetros constructivos eslabón (1-parte 3). Fuente:(Propia).	77
Figura 37. Parámetros constructivos eslabón No. 1. Fuente:(Propia)	78
Figura 38. Parámetros constructivos eslabón No. 2. Fuente:(Propia)	79
Figura 39. Parámetros constructivos eslabón 3. Fuente:(Propia).	80
Figura 40. Parámetros Constructivos Efecto final. Fuente: (Propia).	81
Figura 41. Consolidado de parámetros Geométricos. Fuente: (Propia).	82
Figura 42. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Fuente:(Propia)	84
Figura 43. Numeración de eslabones y articulaciones.	85
Figura 44. Eje de articulaciones. Fuente: (Propia).	86
Figura 45. Geometría de parámetros de diseño. Fuente:(Propia)	87
Figura 46. Código Matlab matriz de transformación A=0-1. Fuente:(Propia)	89
Figura 47. Código Matlab matriz de transformación A=1-2. Fuente: (Propia).	90
Figura 48. Código Matlab matriz de transformación A=2-3. Fuente:(Propia)	91
Figura 49. Código Matlab matriz de transformación A=3-4. Fuente: (Propia)	91
Figura 50. Código Matlab Matriz de transformación definida. Fuente:(Propia).	92
Figura 51. Matriz definida en interfaz gráfica de usuario. Fuente:(Propia)	92
Figura 52. Posición Home. Fuente: (Propia)	93

Figura 53. Método Geométrico para el Análisis cinemático inverso. Fuente: (Propia).	94
Figura 54. Ángulos de representación. Fuente:(Propia).	95
Figura 55. Sumatoria de ángulos de localización espacial. Fuente:(Propia).	96
Figura 56. Análisis cinemática inversa posición 0. Fuente:(Propia).	97
Figura 57. Análisis en interfaz gráfica de usuario. Fuente:(Propia).	100
Figura 58. Análisis GUI Jacobiana Directa P0-P1. Fuente (Propia).	101
Figura 59. Análisis Matriz Jacobiana Directa. Fuente:(Propia).	101
Figura 60. Velocidades angulares P0 - P1. Fuente: (Propia).	102
Figura 61. Representación Efecto final. Fuente: (Propia).	103
Figura 62. Representación Eslabón 3. Fuente: (Propia).	106
Figura 63. Representación Eslabón 2. Fuente: (Propia).	108
Figura 64. Representación Eslabón 1, Parte 2-3. Fuente: (Propia).	110
Figura 65. Representación Eslabón 1, Parte 1. Fuente: (Propia).	112
Figura 66. Algoritmo de programación. Fuente: (Propia).	114
Figura 67. Control parametrizado de actuadores. Fuente: (Propia).	115
Figura 68. Rutina de selección y ubicación de productos a conformidad de producción 1. Fuente: (Propia).	116
Figura 69. Rutina de selección y ubicación de productos a conformidad de producción 2. Fuente: (Propia).	117
Figura 70. Rutina y ubicación de Productos No conformes. Fuente: (Propia).	118
Figura 71. Rutina de ciclo total de Funcionamiento. Fuente: (Propia).	119
Figura 72. Diseño Sistema Electromecánico. Fuente: (Propia).	121
Figura 73. Rutinas de proceso. Fuente: (Propia).	123
Figura 74. Cadena cinemática GUI, Trama 0 - 1. Fuente: (Propia).	126
Figura 75. Cadena cinemática GUI, Trama 1 - 2. Fuente: (Propia).	128
Figura 76. Cadena cinemática GUI, Trama 2 - 3. Fuente: (Propia).	129
Figura 77. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 4. Fuente: (Propia).	130
Figura 78. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 5. Fuente: (Propia).	131
Figura 79. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 6. Fuente: (Propia).	132

INTRODUCCIÓN.

El presente proyecto evidencia el diseño, construcción y puesta a punto de un sistema electromecánico didáctico para la selección de productos generales en una línea de producción. Las actividades de diseño del prototipo se desarrollan haciendo uso de los programas para análisis en ingeniería MatLab y SolidWorks, entre otros, los cuales determinan los cálculos requeridos y los parámetros de diseño.

Para el desarrollo constructivo del sistema se implementa el uso de herramientas didáctico-pedagógicas **LEGO education EV3**. Las pruebas de funcionamiento del dispositivo se ejecutan haciendo uso del software especializado **LEGO education MINDSTORMS EV3**, perteneciente a la misma marca.

El presente trabajo integral de grado le permite al lector identificar la experiencia vivida por parte de los integrantes del equipo de trabajo frente al desarrollo de los diversos momentos del trabajo, los aprendizajes obtenidos, las oportunidades de mejora encontradas, las pruebas y análisis de ingeniería implementadas, entre otros.

CAPÍTULO 1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO.

1.1. Objetivo General.

Diseño, construcción y puesta a punto de un dispositivo electromecánico organizador automático desmontable construido con herramientas LEGO Education compatibles con el ambiente de aprendizaje “Fábrica Didáctica” de la Universidad Antonio Nariño sede sur.

1.2. Objetivos específicos.

- Diseñar bajo determinación de requerimientos técnicos, variables y procesos de diseño electromecánico las hojas de cálculo, programación y operación requeridas para el prototipado del brazo electromecánico teniendo en cuenta los conceptos de física, mecánica y electromecánica necesarios para su desarrollo.
- Realizar diseño constructivo y análisis dinámico del sistema electromecánico aplicando los criterios de ingeniería requeridos.
- Desarrollar el correspondiente análisis dinámico del dispositivo por medio de la aplicación de la extensión de robótica del software Matlab, generando una interfaz gráfica de usuario.
- Construir teniendo en cuenta los parámetros de diseño el sistema electromecánico propuesto haciendo uso de herramientas didáctico-pedagógicas LEGO Education.
- Programación y puesta a punto del sistema electromecánico, utilizando las herramientas de software propias de la marca LEGO Education.

1.3. Antecedentes.

Los sistemas manuales en el desarrollo de actividades industriales están susceptibles a generar errores en el proceso debido a parámetros de interacción humana, baja precisión durante el desarrollo del proceso y grandes tiempos de ejecución.

Las dificultades en estos parámetros pueden minimizarse por medio de la implementación de sistemas automáticos o semiautomáticos de control, los cuales son más precisos en accionamiento y de menor tiempo de ejecución, generando ventajas competitivas en costos y mano de obra. (Revista Dinero , 2017).

De igual manera, frente a los retos de la industria actual se busca la aplicación de técnicas avanzadas que faciliten el desarrollo de procesos operativos de manera eficiente y competitiva. Es por esto, por lo que se hace necesario desarrollar tecnologías inteligentes que busquen satisfacer las necesidades del sector.

Para solucionar dichos retos, la industria debe fomentar la optimización de sus métodos de producción y así, mejorar la calidad de los tiempos de procesos por medio de sistemas integrados automatizados y reducir costos.

En la actualidad hay sistemas de producción y logísticos que requieren de la manipulación de cargas, paquetes o repuestos durante su operación ya sea para guiarlas a las bandas de transporte correctas o clasificarlas y posicionarlas en una ubicación determinada. Estas labores tienen configuraciones variadas que solucionan diferentes necesidades y son hechas en muchos casos por seres humanos.

Dada esta situación, es posible diseñar, construir y poner a punto sistemas prototipo equivalente a los industriales que impliquen la aplicación de los métodos de ingeniería igualmente similares a los de la industria que puedan ser usados con fines de simulación antes de la construcción, utilizando herramientas didácticas para tal fin.

El desarrollo de habilidades en ingeniería por medio del uso de dispositivos didácticos permite a los estudiantes en formación de ingeniería electromecánica y afines fortalecer los conocimientos adquiridos durante el desarrollo teórico de su formación por medio de prácticas simuladas en ambientes de aprendizaje especializados.

De la misma forma, la implementación de actividades con enfoque pedagógico reduce el temor a la interacción con dispositivos electromecánicos, fomenta el análisis de la información obtenida durante la experimentación y cimienta las bases del conocimiento para poder desarrollar actividades en el contexto de la industria; tomar decisiones correctas ante las novedades brindando opciones de solución a los posibles problemas, haciendo eficiente su labor a nivel industrial.

1.4. Justificación.

El presente trabajo integral de grado se efectúa con el fin de implementar herramientas didáctico pedagógicas en entornos de análisis en ingeniería, pretende fortalecer los conocimientos de la carrera Ingeniería Electromecánica adquiridos en la Universidad Antonio Nariño, a través de la propuesta de desarrollo de un sistema electromecánico que cumpla con los parámetros de diseño propios, prototipado con el fin de verificar diversas situaciones del ámbito de la ingeniería, en temas específicos que permitan la automatización y control antes de pasar a una escala industrial.

La implementación de sistemas manuales en la industria, con interacción humana, pueden producir un mayor número de errores, menor precisión y más tiempo en el desarrollo de los procesos. Los sistemas automáticos o semi- automáticos, por su parte, producen menos errores, más precisión y menos tiempo de proceso. (Gallardo, 2018).

Frente a estos retos, la simulación de sistemas de organización automática permite realizar procesos de identificación de las características tecnológicas requeridas para su implementación, los procesos industriales que se aplican en su diseño, los componentes electromecánicos para su construcción y puesta en funcionamiento y la programación de variables que permitan el control y optimización del proceso a desarrollar, haciendo que esta labor sea una práctica eficiente, compatible y aplicable a la realidad industrial y de esta forma ofrecer métodos eficientes que compitan con los parámetros establecidos a nivel global. (Revista Dinero , 2017).

La Universidad Antonio Nariño UAN adquirió a finales del año 2018 el Laboratorio Tecnológico denominado “Fabrica Didáctica” que está diseñado para la implementación de actividades académicas bajo un enfoque ingenieril, y que permite que los estudiantes desarrollen habilidades multidisciplinarias haciendo uso de herramientas académicas y tecnológicas de última generación. Este ambiente de aprendizaje didáctico-pedagógico está proyectado para su implementación a nivel nacional y pretende ser referente de éxito en nuestro país.

Es entonces donde el presente proyecto de grado integra el uso de los dispositivos LEGO *education* como herramientas de desarrollo de prototipos que, bajo parámetros de ingeniería, permite evidenciar la aplicación de los conceptos y métodos requeridos a nivel industrial.

1.5. Metodología.

El diseño del sistema electromecánico contempla las etapas correspondientes, teniendo en cuenta la metodología establecida de la siguiente manera:

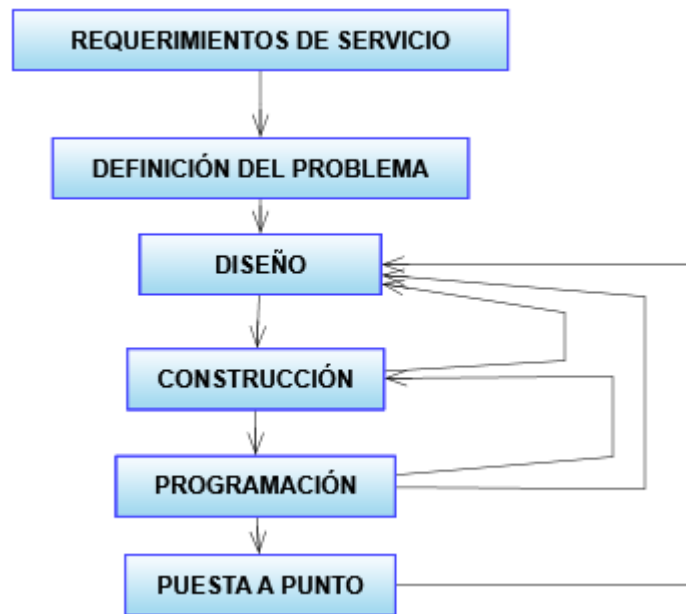


Figura 1. Diagrama de proceso metodológico. Fuente: (Propia).

1. Determinación de los **Requerimientos de servicio**, se determina el espacio de trabajo y las características de los productos a manipular.
2. **Definición del problema**, se establecen las características físicas del entorno de trabajo y las rutinas de trabajo requeridas para satisfacer los requerimientos.
3. **Diseño:**
 - Diseño teórico del sistema electromecánico, cálculos de ingeniería del dispositivo.

- Consolidación de archivos de despiece bajo entorno de diseño SolidWorks, desarrollo constructivo virtual del sistema electromecánico para el análisis dinámico del dispositivo.
 - Desarrollo de interfaz gráfica de usuario (GUI) para el análisis cinemático del sistema electromecánico haciendo uso del software Matlab.
4. **Construcción**, desarrollo constructivo físico del dispositivo haciendo uso de herramientas LEGO *education MINDSTORMS EV3*.
 5. **Programación** del sistema electromecánico haciendo uso de las herramientas de software para programación LEGO *education MINDSTORMS EV3*.
 6. **Puesta a Punto**, pruebas de funcionamiento, modificaciones y ajustes al dispositivo y su programación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO.

En el presente capítulo se definen términos importantes que serán utilizados a lo largo del desarrollo del proyecto; de la misma manera, información técnica relevante respecto a los programas de diseño Matlab y SolidWorks, los equipos y dispositivos elegidos propios de la marca LEGO *education MINDSTORMS EV3* y sus componentes especializados.

Así mismo, se describen los procesos por medio de la obtención de las ecuaciones principales con el fin de aplicarlas en los cálculos de ingeniería, sin desconocer su origen matemático.

2.1. Herramientas didáctico-pedagógicas LEGO education

Conjunto de sistemas tecnológicos que permiten el desarrollo prototípico de dispositivos y el análisis de diversos parámetros de aplicación en el campo educativo.

2.1.1. LEGO y su historia.

La palabra LEGO es la unión de dos términos daneses: “*leg godt*” que significa “jugar bien”, a su vez, en latín significa “poner juntos”. Estas palabras fueron inspiración para el fundador de la empresa para darle nombre.

LEGO ha evolucionado hasta el sistema de bloques plásticos de la actualidad. Sus orígenes se iniciaron en el taller del humilde carpintero Ole Kirk Christiansen, de la ciudad Billund, Dinamarca. Su innovador negocio creció de una empresa familiar hasta transformarse en una de las compañías de juguetes más reconocidas del mundo, hasta 2005 fue dirigida por el nieto del fundador, el señor Kjeld Kirk Kristiansen.

Cada ladrillo LEGO hace parte de un sistema que ha ido creciendo a través de los años, esta es una de las grandes virtudes de los conjuntos de elementos.

Los nuevos juegos y series lanzados son 100% compatibles con las “clásicas” piezas LEGO, independientemente de su tamaño, forma o función, embonan con las demás piezas LEGO de diversos conjuntos. (DAVID, 2013).

Desde el inicio de los procesos productivos de ladrillos de plástico LEGO, la empresa ha lanzado diversos motivos y temas, pasando por kits de dinosaurios y castillos medievales, hasta dispositivos de robótica avanzada que permiten la interacción de los usuarios y la variedad.

Constantemente son lanzadas nuevas piezas al mercado, aumentando la versatilidad de los dispositivos LEGO. De igual manera, existen gran variedad de actuadores, engranes, dispositivos de iluminación, cajas de sonido y cámaras disponibles para ser usados con otros componentes LEGO.

El set LEGO *education MINDSTORMS EV3* permite involucrar a los estudiantes de diversos niveles formativos, al proporcionar los recursos para diseñar, construir y programar sus creaciones, a su vez, los motiva a desarrollar habilidades esenciales para la vida como el pensamiento creativo y crítico, el pensamiento ingenieril, la colaboración y la comunicación. Un Kit *LEGO education* viene con una guía de inicio, tutoriales en video y planes de lecciones alineados con los estándares formativos del mundo moderno. (Hedrich, 2014).

La empresa de juguetes y herramientas educativas se ha reinventado en las últimas décadas y en unión con universidades, instituciones educativas y empresas privadas, ha realizado eventos como el “*First Lego League*”, en los que estos dispositivos de juego y por medio de la didáctica, se usan para despertar en los jóvenes el interés por la ciencia, la tecnología, la investigación y la innovación, con metodologías propias del pensamiento STEM. (Alcalá., 2019).

- **Ambientes de aprendizaje.**

Los ambientes de aprendizaje tecnológicos (A.A.T) son circunstancias espacio-temporales específicas generadas con el propósito que, mediante la acción de los actores participantes, se produzcan transformaciones significativas actitudinales, cognitivas y/o axiológicas.

Es decir, son espacios dinámicos (en el tiempo) para el fortalecimiento humano, que exigen el compromiso de los individuos que participan en el proceso educativo y que, en interacción con el ambiente, generen en los individuos transformaciones

específicas como el desarrollo de competencias en el ámbito del aprendizaje. (ADTECH S.A, 2010)

Por más de 35 años, LEGO *education* ha brindado procesos de enseñanza-aprendizaje lúdico que combinan los materiales relevantes con los planes de estudios de diversas instituciones educativas del mundo. El sistema de ladrillos LEGO, configurado como herramienta educativa, fomenta la formación de docentes y el desarrollo profesional de las personas, aplicando principios de aprendizaje práctico. “Con seis ladrillos hay más de 1.800 posibles combinaciones para crear un pato”, de ahí en adelante, la versatilidad de los kits permite usar estas piezas en diferentes áreas del conocimiento: robótica, programación, matemáticas, ciencia, física y lenguaje. (Revista Semana Educación, 2019)

- **Tecnología LEGO MINDSTORMS Education EV3.**

La empresa LEGO fabrica una línea de robótica, que contiene elementos propios de las hipótesis del tema, como la unión de diversos elementos y piezas en interacción con la sistematización de acciones de manera interactiva. Este sistema se distribuye desde 1998.

En una época difícil para la compañía, nace el sistema LEGO MINDSTORMS a partir de un convenio pactado entre la fábrica LEGO y el *MIT*, Instituto Tecnológico de Massachusetts por sus siglas en inglés. Como parte primordial del acuerdo, LEGO financió investigaciones del grupo de epistemología y aprendizaje del MIT acerca de cómo aprenden los niños, obteniendo nuevas ideas para sus productos, los cuales se podrían comercializar sin realizar pagos por concepto de regalías a la institución educativa.

Uno de los resultados de este convenio con el instituto fue el MIT Programable Brick (Bloque programable MIT). (Christopher Beland, 2000), en sus comienzos, se publicita como Sistema de Invención Robotizado (*RIS 1*). A su vez, se mercadea

como herramienta educativa, denominada LEGO *MINDSTORMS* para la escuela, la cual viene con un software de programación integrado en la guía de usuario del sistema. (LEGO, 2013) (Christopher Beland, 2000).

2.1.2. Componentes del sistema LEGO *Education MindStorms EV3*.

La herramienta LEGO *education MINDSTORMS EV3* es la seleccionada para el desarrollo constructivo de un modelo de sistema integrado electromecánico, el cual, haciendo uso de elementos controlados por computador y un conjunto de ladrillos de la marca, permite la automatización y control de sistemas robóticos. Las características principales de los componentes que conforman el sistema didáctico-pedagógico se exponen a continuación.

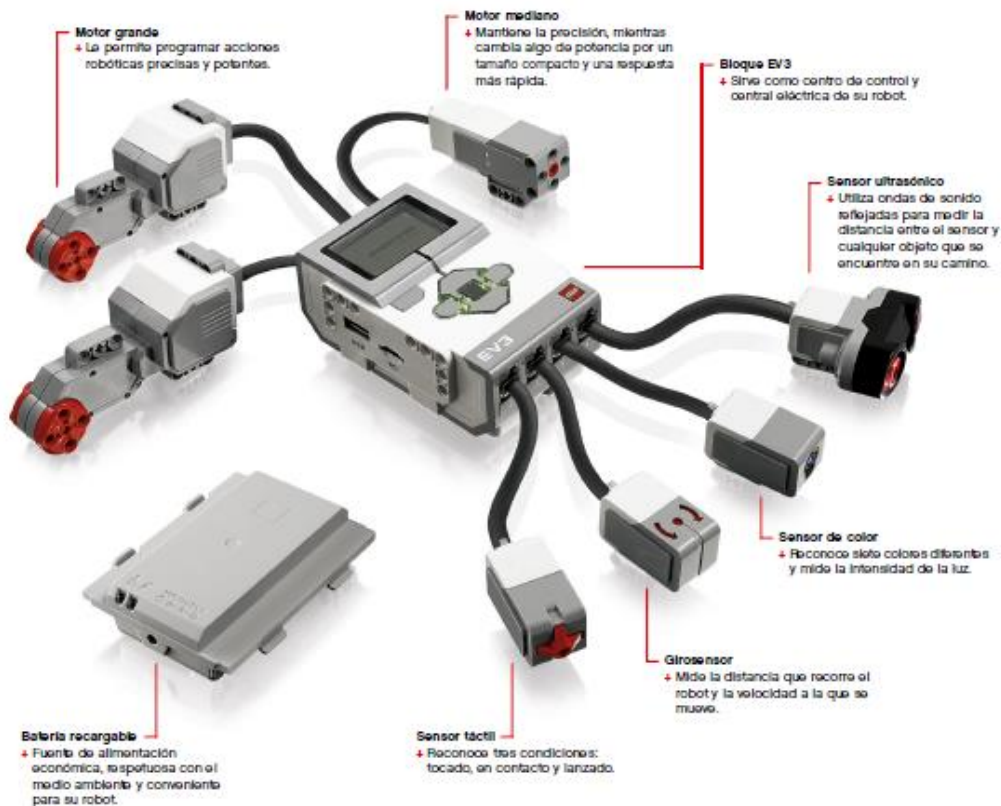


Figura 2. Bloque EV3. Fuente (LEGO, 2013)

- **Ladrillos LEGO, LEGO Technic y LEGO Education.**

Los diferentes ladrillos LEGO componen un sistema universal. A pesar de la variación en el diseño y la función de los bloques a lo largo de los años, estos siguen siendo compatibles en menor o mayor grado. Es posible encajar los bloques de LEGO de 1958 con los de la actualidad, de igual manera, los sets hechos para niños pequeños también son compatibles con los hechos para adolescentes.

Después de una serie de pruebas, la materia prima utilizada hasta el momento (acetato de celulosa, que se basa en madera) se suspende en 1963 a favor del ABS, más estable y rápido en color (acrilonitrilo butadieno estireno). Las mejoras de material permiten una mayor precisión en el moldeo, que ahora se realiza con una precisión de 1/200 mm. Los principios están aprobados para el control consciente del proceso de moldeo y se convierten en la filosofía de moldeo de LEGO, definida por el experto en plásticos de la compañía, Hans Schiess. (The LEGO group, 2020)

Su gran tenacidad es el rasgo más resaltable del ABS, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a -40 °C). Adicionalmente, es duro y rígido, posee una resistencia química pertinente, presenta reducida absorción de agua y buena estabilidad dimensional, además tiene una elevada resistencia a la abrasión y puede permite su recubrimiento con una capa metálica de manera fácil.

Teniendo en cuenta su aceptable resistencia mecánica y en combinación con su facilidad para el procesado, la materia prima de ABS tiene importantes aplicaciones en la ingeniería, es soluble en acetona y, a pesar de no ser biodegradable, carece de resistencia a la radiación UV. No contiene cloro ni es tóxico, haciéndolo ideal para aplicaciones con alimentos y agua apta para consumo humano.

Al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno, la resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada, no obstante, reduce la resistencia a la tensión y disminuye a su vez la temperatura de deformación por calor.

Las propiedades que tiene el ABS son resultado de la aportación de sus tres componentes:

- El acrilonitrilo proporciona: Resistencia química, resistencia a la fatiga, la dureza y la rigidez, al igual que, resistencia térmica.
- El butadieno suministra: Resistencia al impacto, ductilidad a baja temperatura y resistencia a la fusión.
- El estireno proporciona: Brillo, dureza, rigidez y facilidad de procesamiento (fluidez). (Newell., 2010).

El uso del programa SolidWorks, nos permite identificar sus características generales, por medio de las librerías contenidas en el software.

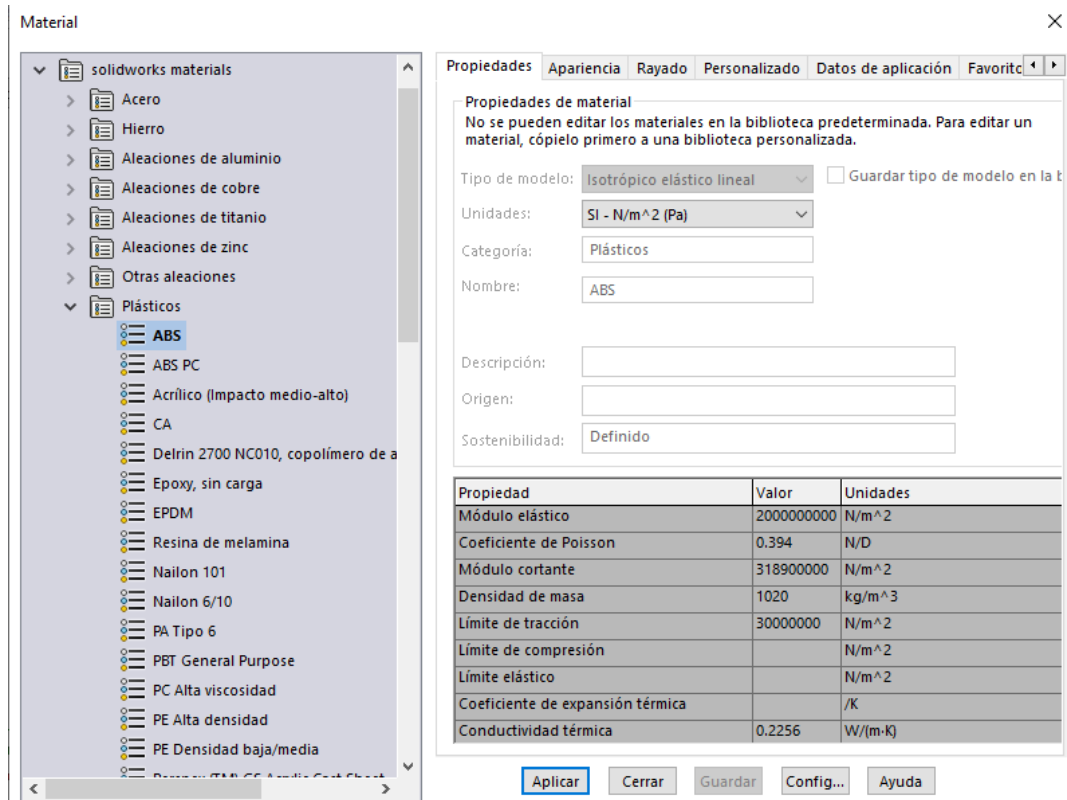


Figura 3. Propiedades de material ABS. Fuente: (SolidWorks)

A fines de la década de 1960, el Sistema LEGO comienza a expandirse. La compañía desarrolla un gran ladrillo LEGO, que es ideal para manos pequeñas. Cada una de sus dimensiones es exactamente el doble que la de un ladrillo LEGO estándar, inspirando el nombre del nuevo producto: DUPLO ®, derivado de la palabra latina duplex, que significa "doble". Tras un lanzamiento de prueba en Suecia en 1968, LEGO DUPLO se internacionaliza en 1969. Esto amplía el grupo de usuarios de la compañía para incluir a niños en edad preescolar.

En 1977, el Grupo LEGO satisface las necesidades de los niños mayores (y adultos aficionados) a quienes gradualmente les resulta demasiado fácil construir con ladrillos LEGO. Se desarrolla un nuevo producto para el mercado: LEGO Technic. Es un poco más complejo de construir, y los modelos generalmente incorporan funciones técnicas, por ejemplo, una grúa o un equipo similar. (The LEGO group, 2020)

Los kits LEGO education integran el uso de ladrillos LEGO Technic, los cuales se caracterizan por ser dimensionados teniendo en cuenta el ancho (L) de la pieza:

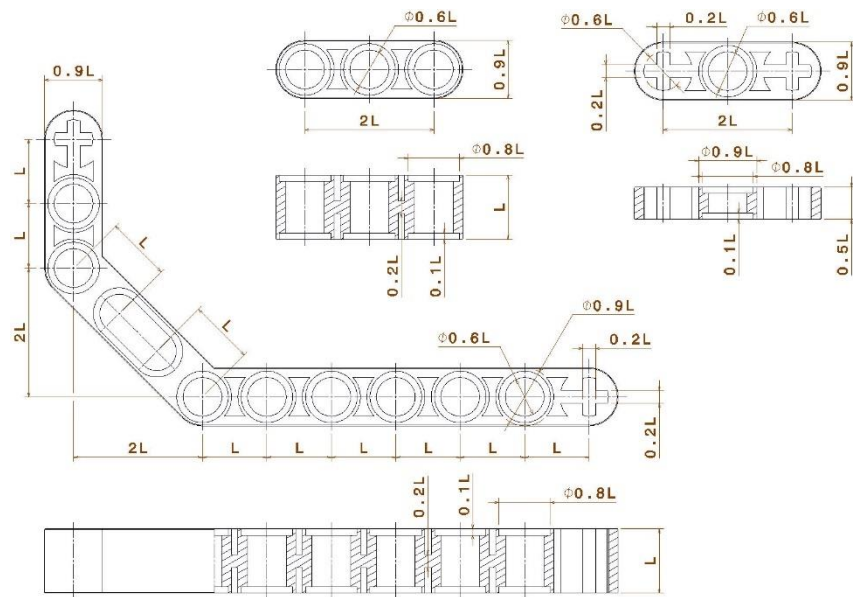


Figura 4. Sistema de referencia para el cálculo dimensional de ladrillos LEGO Parte 1.

Fuente: (3D íires, 2014)

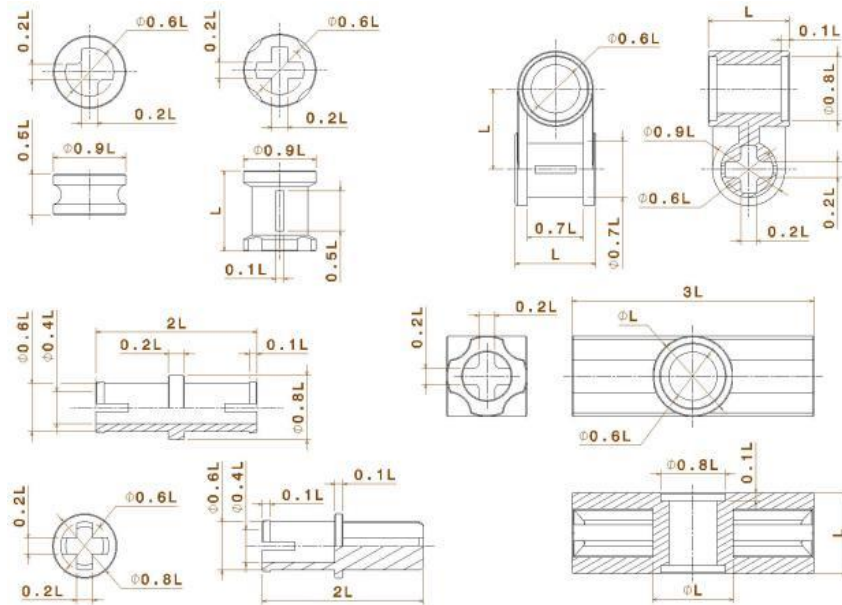


Figura 5. Sistema de referencia para el cálculo dimensional de ladrillos LEGO Parte 2.

Fuente: (3D'ires, 2014)

Desde 1982, cuando se presentó LEGO Technic I como el primer producto para las escuelas, el enfoque dentro de las áreas escolares ha sido conceptos como matemáticas, ciencias y tecnología, y codificación / robótica.

A lo largo de los años, este enfoque ha introducido varios productos, incluidos los primeros productos controlados por computadora: LEGO Technic Control I y II introducido a mediados de la década de 1980, así como máquinas simples tempranas diseñadas para ayudar a los estudiantes jóvenes a comprender conceptos básicos de ciencias del mundo real y simples y Powered Machines, desarrollado para niños mayores para modelar comportamientos físicos. (The LEGO group, 2020)

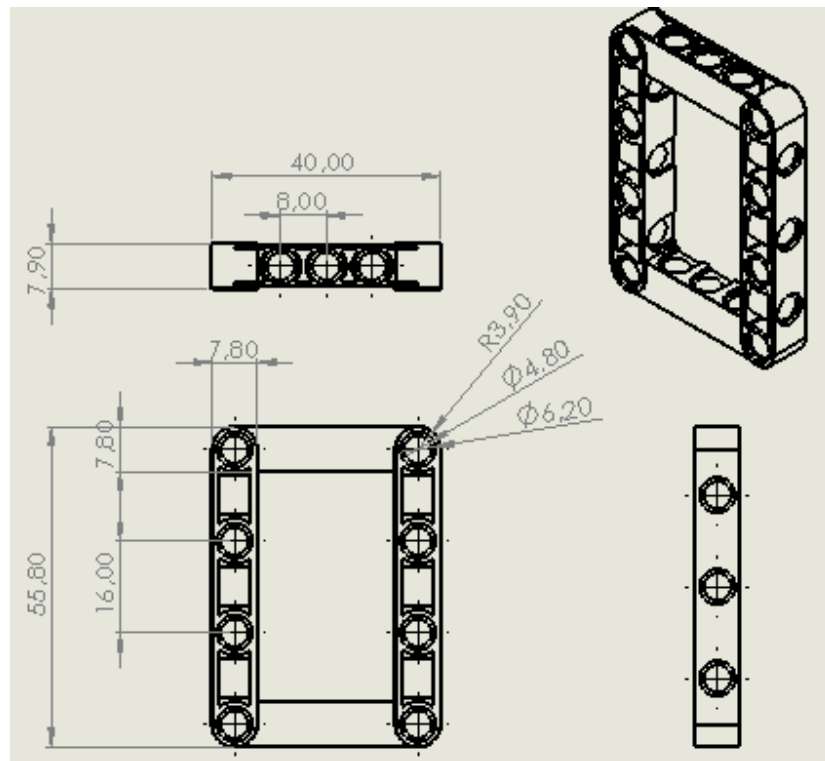


Figura 6. Aplicación cálculo dimensional de ladrillos LEGO. Fuente: (Propia)

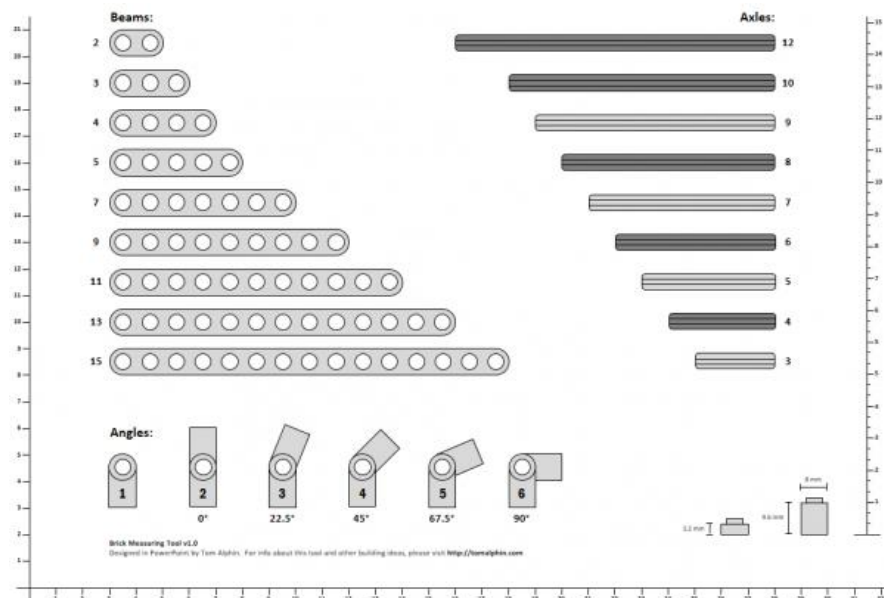


Figura 7. Relación de tamaño Vigas, Ejes y Ángulos LEGO. Fuente: (3D'lires, 2014).

- **Bloque EV3.**

En 1987, el Grupo LEGO lanzó un nuevo producto LEGO, LEGO Technic Control 0, un producto que se puede programar con una versión especial de LOGO desarrollado por Seymour Papert. Pese a que este producto es el primer resultado de la colaboración entre Seymour Papert, su equipo en MIT Media Lab y el Grupo LEGO, ciertamente no es el único. El producto más notable concebido por la colaboración es LEGO MINDSTORMS TM lanzado en 1998. Desde 1999, los productos MINDSTORMS también han sido parte de la cartera de productos de LEGO Education, lo que brinda a los estudiantes una solución práctica de STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas). (The LEGO group, 2020)

Como protagonista del sistema LEGO *education MINDSTORMS EV3* se destaca el Ladrillo Programable, el bloque inteligente que realiza el control de los actuadores y sensores, además de entregar comunicación inalámbrica con la interfaz de equipos electrónicos para su programación.

En la pantalla es posible observar los sucesos internos del Bloque EV3 permitiendo utilizar la interfaz gráfica para el control de los dispositivos, a su vez, es posible adicionar respuestas alfa-numéricas o gráficas al código de programación o a los ejercicios experimentales. Los botones del Ladrillo programable EV3 permiten examinar el interior de la interfaz, también pueden utilizarse para iniciar los programas.

- **Motores.**

Es la parte sistemática de una máquina, tiene la capacidad de hacer funcionar un sistema o dispositivo, realizando un trabajo al transformar un tipo determinado de energía en energía mecánica. (Molina, Cánovas Rodríguez, & Ruz, 2007).

Los motores utilizados en el sistema electromecánico son de tipo CD (Corriente Directa) y son:

- **Motor grande:**

Es un motor “inteligente”, versátil y potente. Posee un sensor de rotación integrado con resolución de 1 grado que permite el control preciso de movimientos. Este actuador se ha optimizado para ser la fuente de movimiento de los robots LEGO *Education*. Al hacer uso de los bloques de programación: mover la dirección y mover tanque, los actuadores coordinan sus acciones de forma simultánea.

El Motor grande funciona de 160 a 170 rpm (revoluciones por minuto), con torque de rotación de 20 N.cm. (Newton por Centímetro) y un torque de rotor bloqueado de 40 N.cm. (más lento, pero más potente).



Figura 8. Motores LEGO. Fuente: (LEGO, 2013)

- **Motor mediano:**

Al igual que el anterior, posee un giro-sensor integrado, con resolución de 1 grado, es de menor tamaño y menos pesado que el motor grande, esto permite una

respuesta de acción más rápida. El actuador mediano puede programarse para ser encendido o apagado, permite el control del nivel de energía o para funcionar bajo diversos parámetros.

El Motor mediano funciona entre 240 y 250 rpm, con un torque de rotación de 8 N.cm. y un torque de rotor bloqueado de 12 N.cm. (más rápido, pero menos potente). (LEGO, 2013).

- **Sensores.**

Un sensor es un dispositivo que está en capacidad de detectar variables de instrumentación (magnitudes físicas o químicas) y convertirlas en variables de tipo eléctrico. Estos parámetros de instrumentación pueden determinarse por: tamaño de trayecto, aceleración, inclinación, temperatura, intensidad lumínica, presión, movimiento, fuerza, torsión, humedad, pH, etc. (Barrientos, 2007).

- **Sensor de luz y color.**

Es un dispositivo digital que puede identificar el color o determinar la intensidad de la luz que ingresa por el lector de la cara del sensor, puede utilizarse de tres modos diferentes: Modo determinación de color, modo intensidad de luz reflejada y modo intensidad de la luz ambiental.

En el sistema electromecánico objeto de estudio del presente trabajo integral de grado se utiliza el sensor de luz, en el modo de parametrización de color, el cual, reconoce siete colores: café, negro, azul, verde, rojo, amarillo y blanco, además, reconoce la ausencia de color como parámetro adicional. Esta capacidad de diferenciar los colores le permite al dispositivo robótico, mediante la programación adecuada, estar programado para catalogar objetos de colores a medida que los

detecta o para detenerse cuando identifica un color de los mencionados. (LEGO, 2013).

- **Girosensor.**

El sensor de giro es un dispositivo digital que está en capacidad de detectar el movimiento de rotación en un eje simple. Al girar en la dirección indicada por las flechas del chasis del sensor, el dispositivo puede determinar la razón de rotación en grados por segundo. Puede medir una razón máxima de 440 grados por segundo y registrar el ángulo de rotación total en grados, el cual sirve para detectar cuánto ha girado el sistema robótico permitiéndole programar la rotación sobre el eje que está midiendo el sensor con una exactitud de +/- 3 grados en un giro de 90 grados. (LEGO, 2013)

- **Sensor táctil.**

Es un dispositivo analógico que permite identificar el instante en el que se obtura y se suelta su botón de color rojo. Es posible ser programado para operar de acuerdo con tres condiciones: presionado, lanzado o en contacto (tanto presionado como lanzado). (LEGO, 2013).

2.1.3. Software LEGO Education MINDSTORMS.

Hasta 2019 ha habido tres generaciones de LEGO *MINDSTORMS*: los bloques de programación RCX, NXT y EV3.

En colaboración concertada con el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) la empresa LEGO desarrolla el “*MIT Programmable Brick*” (Ladrillo Programable), en cabeza del doctor Seymour Papert, quien hizo parte del equipo de creadores del lenguaje de programación didáctico Logo y quien lideró el proyecto. El ladrillo programable permitía la conexión y control de motores y sensores, en la cual la información del programa se transmitía por medio de sistemas infrarrojos y era posible ser programado en un lenguaje parecido al Brick Logo.

En 1998, LEGO lanza los primeros ladrillos o bloques inteligentes, con el nombre *LEGO MINDSTORMS RCX (Robotics Command Explorer)*. Este dispositivo era programado con un lenguaje gráfico intuitivo, luego se adicionaron otros lenguajes. El ladrillo de programación RCX cuenta con tres puertos para motores y tres adicionales para los sensores, la comunicación se realizaba mediante un puerto serie, más adelante, se implementaron sistemas de comunicación por medio de infrarrojos. Por su parte, las especificaciones de hardware integraban un microcontrolador Renesas de 8-bit H8/300, una ROM de 16 KB y una RAM de 32 KB.

La segunda generación de la familia *MINDSTORMS*, lanzada en 2006, fue NXT, caracterizada por su popularidad entre los usuarios; esta generación se compone de dos versiones: la educativa y la 2.0. Se innova en el sistema de comunicación por medio del dispositivo Bluetooth integrado, el cual, admitía la conexión con otros bloques programables y dispositivos móviles, manteniendo la opción de comunicación vía USB.

A demás de la programación gráfica proporcionada oficialmente por LEGO con NXT-G, el sistema permite la interacción con diversos lenguajes de programación, algunos de estos son: ROBOTC, NXC, Enchanting, una toolbox de Matlab aplicada a NXT, etc.

La actual generación de dispositivos la protagoniza el LEGO *education MINDSTORMS EV3*, cuyo lanzamiento ocurrió en el año 2013, su sobresaliente cambio está basado en la integración de los más recientes avances tecnológicos en

el ladrillo programable, los cuales proporcionan mayor precisión en motores y dispositivos de sensor.

El bloque programable cuenta con cuatro puertos de salida para conectar los sensores y cuatro puertos de entrada para los motores. Tiene un puerto para tarjetas Micro SD, que le permite aumentar la capacidad de memoria del ladrillo EV3, un puerto USB para adaptar un dispositivo wifi o realizar conexiones en cadena, un altavoz integrado, un receptor infrarrojo y uno para sistemas Bluetooth.

En referencia al hardware, se puede destacar el microcontrolador ARM926EJ-S de 300 MHz, una RAM de 64 MB y 16 MB de memoria Flash.

Actualmente, la comunidad dedicada a la programación de dispositivos robóticos bajo ambientes LEGO aún está creando soluciones que permitan hacer ejercicios de programación del bloque, sin embargo, ya existen lenguajes de codificación en los cuales se puede programar: LabVIEW, Mono brick, una toolbox de Matlab aplicada a EV3, lejos, C++, Python, entre otros. (LEGO, 2013)

El sistema LEGO *education MINDSTORMS EV3* es la herramienta tecnológica seleccionada para la implementación del dispositivo electromecánico del presente trabajo integral de grado. En el manual de usuario (anexo No. 1) se describe con mayor claridad los diversos procedimientos y características referentes al programa.



Figura 9. Software de programación MindStorms EV3. Fuente: (LEGO, 2013)

A demás, el programa cuenta con información detallada de los métodos de programación y el funcionamiento de los diversos íconos de codificación, entre otros.



Figura 10. Herramienta de ayuda Software de programación MINDSTORMS EV3 (F1). Fuente: (Propia)

2.1.4. Aplicación LEGO Gear Calculator.

Esta herramienta está diseñada para poder calcular la relación final de hasta 10 pares de engranajes, luego de seleccionar el tipo deseado, teniendo en cuenta el número de dientes del engranaje y el número de motores, la aplicación permite ver la salida teórica del sistema, la velocidad en revoluciones por minuto y par de arranque en Newton por centímetro. Incluye 14 tamaños de ruedas dentadas LEGO y 23 tipos diferentes de motores LEGO. También se incluye: una calculadora de relación planetaria para engranajes LEGO, un acoplador de engranajes para encontrar combinaciones de engranajes disponibles en el espacio entre ejes dado y Gearcyclopaedia con información detallada sobre 38 tipos de engranajes LEGO.

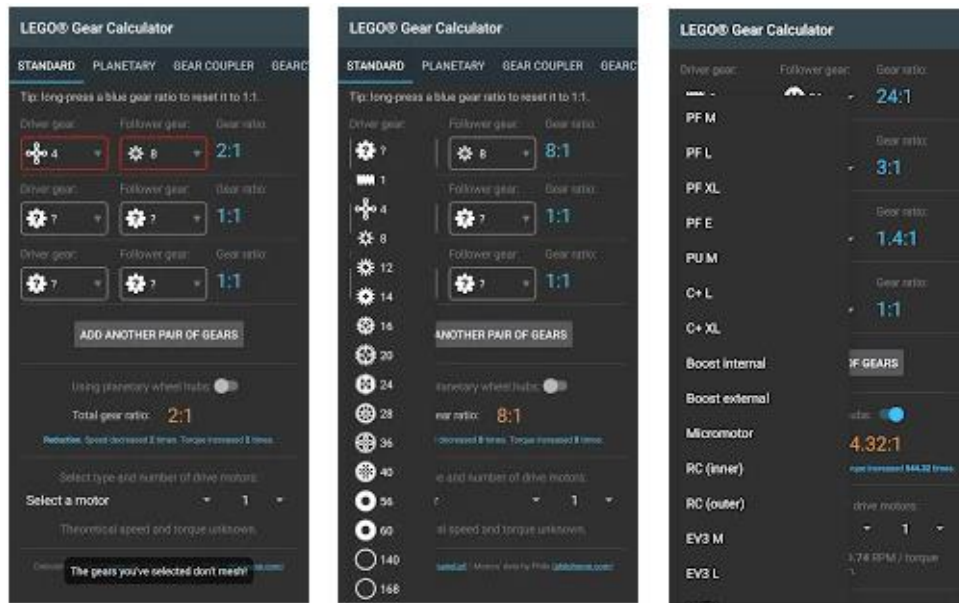


Figura 11. LEGO Gear Calculator. Fuente: (Propia)

Esta aplicación es de carácter gratuito y se encuentra disponible para descarga por medio de las diversas tiendas de aplicaciones.

Se selecciona el programa para realizar el análisis de los parámetros teóricos de los dispositivos LEGO, teniendo en cuenta su similitud con los valores teóricos disponibles en los manuales del fabricante.

2.2. Robot Manipulador Industrial.

Un robot es un dispositivo de manipulación automática servo-controlado, de programación variable, multivalente, con capacidad de ubicar y orientar utensilios, dispositivos especiales o diversas piezas, siguiendo diversas trayectorias, para la realización de tareas variadas. Comúnmente, posee la estructura o configuración de uno o varios brazos finalizando en una muñeca. El sistema de control puede incluir en ocasiones unidades de memoria y dispositivos de reconocimiento del entorno. Su uso, por lo general, es el de desarrollar tareas cíclicas o repetitivas

(Bucles), esto permite realizar adaptaciones permanentes en los materiales de constitución.

El robot manipulador, es a su vez, un sistema electromecánico de operación de 3 o más ejes, con control automatizado reprogramable de movimientos, su objetivo es el desarrollo de sistemas de automatización y control industriales, incluyendo al manipulador (sistema electromecánico y sistema de accionamiento) y al hardware de control (programa y sistema de control y potencia). (Barrientos, 2007).

2.2.1. Estructura Mecánica de un Robot.

El sistema está conformado por un conjunto de elementos de carácter mecánico o eslabones, los cuales se unen por medio de articulaciones, las cuales permiten el movimiento entre cada dos eslabones consecutivamente relacionados. Respecto a la configuración física de la mayoría de los robots manipuladores industriales, esta mantiene características similares con la estructura anatómica del brazo humano, es por esto que, para referirse a los diferentes componentes del robot, en ocasiones son utilizados los conceptos de cuerpo, brazo, codo y muñeca.

El movimiento de cada una de las articulaciones puede ser determinado por su desplazamiento, su giro, o la combinación de ambos. Se denomina grado de libertad (GDL) a los movimientos independientes que puede realizar cada una de las articulaciones, en referencia de la anterior.

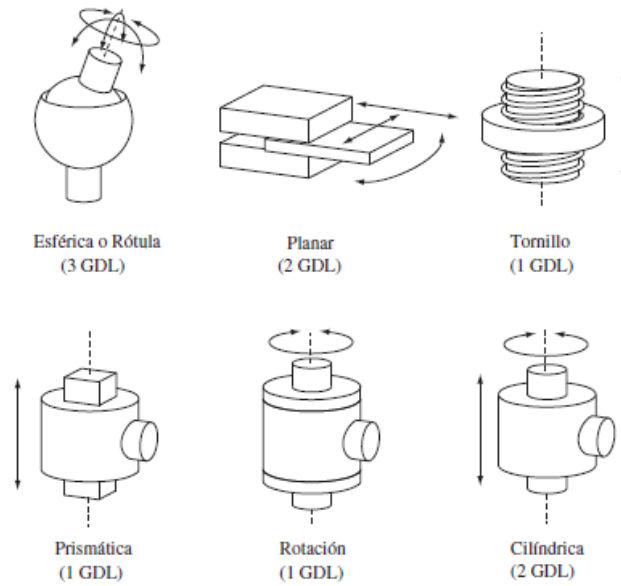


Figura 12. Movimientos en articulaciones. Fuente. (Barrientos 2007)

A una serie de barras unidas por articulaciones o eslabones, se le denomina cadena cinemática. La estructura mecánica de un sistema de manipulación robotizado está compuesta por una cadena cinemática.

Los robots manipuladores son generalmente cadenas cinemáticas abiertas, que cuentan con articulaciones de rotación o de tipo prismática (con un solo grado de libertad cada una), es por esto por lo que, determinar la cantidad de grados de libertad del manipulador es generalmente sencillo en esta configuración, debido a que coincide con el número de articulaciones que lo componen. (Barrientos, 2007)

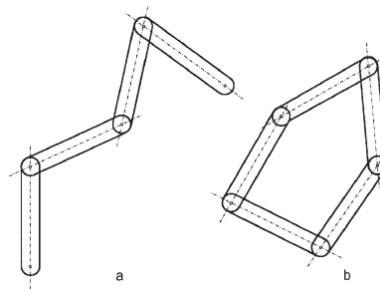


Figura 13. Cadena Cinemática: a) abierta b) cerrada. Fuente: (Barrientos)

2.2.2. Brazo Robótico.

Es un tipo de dispositivo robótico con un conjunto electromecánico que conserva similitudes en su configuración a la de un brazo humano, posee la equivalencia de un hombro, un codo y la muñeca, dependiendo de los grados de libertad de su diseño. Por lo general, está montado en una base con una estructura fija que se asemeja al hombro del sistema. Este tipo de robots pueden pivotar de maneras diferentes (GDL). La función del brazo robótico es la de trasladar un efector final de un sitio a otro. Dependiendo de lo que se esté haciendo o realizando, se pueden instalar diversos tipos de dispositivos finales. (Robótica, Irene Alvares Caro).

- **Tipos y funciones.**

Dependiendo de las necesidades específicas de cada industria o fábrica, es posible encontrar variedad de dispositivos manipuladores en el mercado. Estos facilitan la labor de los trabajadores de las industrias, aumentando el rendimiento y la productividad. De esta manera, permiten el desarrollo de labores difíciles de levantamiento de cargas o traslados de pesos, la manipulación de objetos costosos o que representan peligros para el ser humano.

Sin embargo, es posible utilizar sistemas de articulación, como las esféricas, en robots con cadena cinemática cerrada, para esto se precisa determinar el número de GDL con mayor rigor.

Las diversas combinaciones de articulaciones de un dispositivo manipulador dependen de distintas configuraciones, con parámetros específicos para tener en cuenta tanto en su aplicación como en el diseño de sistema.

En los sistemas robotizados que cuentan con una cadena cinemática abierta, es frecuente encontrar las siguientes configuraciones:

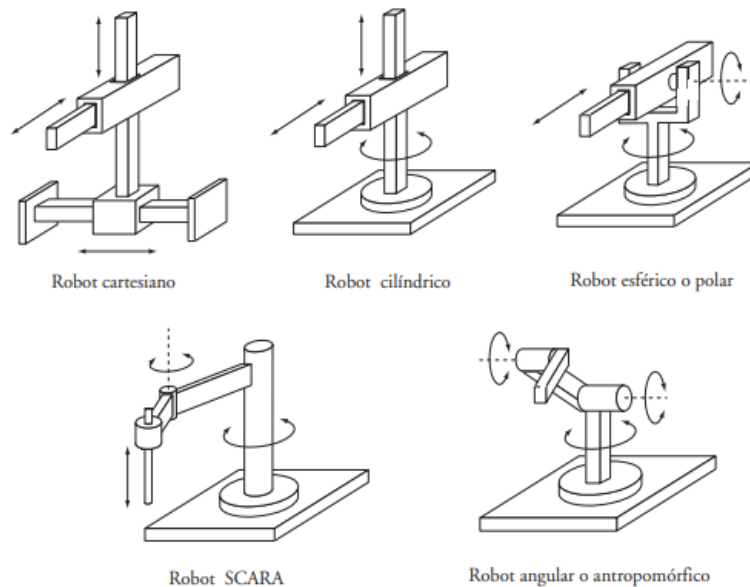


Figura 14. Tipos de Robots. Fuente: (Robótica, Irene Alvares Caro.)

En donde se analizan los parámetros de las tres (3) articulaciones iniciales del manipulador, las cuales son las de mayor importancia en el momento de establecer la posición de su extremo en un determinado punto del espacio de trabajo.

Los sistemas robóticos denominados de “estructura paralela”, y que cuentan con cadena cinemática cerrada son menos frecuentes en la industria. (Barrientos, 2007).

Tipos de robots manipuladores:

- Robot cartesiano: Es utilizado frecuentemente en trabajos de soldadura y procesos de ensamblado automatizado, su principal característica es la configuración de sus ejes, los cuales son coincidentes con los tres ejes cartesianos.

- Robot cilíndrico: Sus ejes describen un sistema de coordenadas de círculos concéntricos, permitiéndole maniobrar máquinas, es utilizado de manera frecuente en funciones de soldadura de punto.
- Robot esférico o polar: Sus ejes forman un sistema de coordenadas polar. Esto significa que, en un círculo un eje va de arriba a abajo y otro de derecha a izquierda (como norte-sur este-oeste). Esta configuración puede realizar labores de soldadura, fundición y operación de máquinas y herramientas.
- Robot SCARA: Es un dispositivo con dos articulaciones giratorias paralelas, que le permiten realizar funciones de coger y ubicar (*pick and place*).
- Robot angular: tiene como mínimo tres articulaciones que rotan sobre sí mismas, permitiéndole desarrollar tareas más complejas. Su mayor capacidad de giro le permite realizar desde tareas de soldadura hasta trabajos de pintura con diferentes mecanismos.
- Robot paralelo: Sus brazos tienen articulaciones configuradas a manera de prisma. Su principal uso se evidencia en la plataforma móvil los simuladores de vuelo. Su gran nivel de rotación facilita mayor variedad y complejidad de movimientos. (Robótica, Irene Alvares Caro)

La mayoría de los manipuladores actuales, responden a la configuración angular o articular, seguidos de los de estructura Cartesiana y SCARA. Los robots de estructuras esférica y cilíndrica, comunes en los inicios de la robótica, están prácticamente descontinuados. (Barrientos, 2007)

2.3. Dinámica del robot.

La dinámica se ocupa de la correlación entre las fuerzas que influyen sobre un cuerpo y el movimiento originado en este. Por tanto, el modelo dinámico de un robot

obtener las características de esta relación, se determina por medio del modelo dinámico que se define por la relación matemática entre:

- La localización del manipulador determinada por sus variables articulares o por las coordenadas de ubicación de su extremo, y sus correspondientes derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas y momentos aplicados en las articulaciones (o en el extremo del robot).
- Las características dimensionales del sistema robótico, como longitud, masas y centros de inercia de sus eslabones. (Barrientos, 2007).

2.3.1. Cinemática del robot.

El estudio de los movimientos del robot con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen es el objetivo de la cinemática, la cual se interesa por la representación analítica del movimiento espacial del manipulador como una función del tiempo, particularmente determinada por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares.

Problemáticas principales para solucionar en la cinemática de un robot:

- a. Problema cinemático Directo.
- b. Problema cinemático inverso.

A su vez, se tendrán en cuenta las fuerzas que actúan sobre un cuerpo rígido, posteriormente serán utilizados los datos obtenidos para analizar la aplicación de fuerzas estáticas con los manipuladores, produciendo como resultado la cinemática diferencial descrita por:

c. Matrices Jacobianas.

Estos parámetros se determinan por diversos métodos, a continuación, los seleccionados para el análisis del presente trabajo integral de grado.

a. Cinemática Directa

Por medio de la aplicación de los valores paramétricos de las articulaciones y las características geométricas de los elementos del robot, se determina la posición y orientación de su extremo final, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

El modelo cinemático directo será utilizado con el fin de presentar al lector información en referencia a la localización del extremo del robot. Las variables articulares, en algunos sistemas industriales especializados, pueden ser leídas de forma directa por diversos sensores y por la unidad de control del dispositivo.

Es posible determinar el modelo cinemático directo por medio de dos enfoques distintos, mediante métodos geométricos y por métodos basados en modificaciones de los sistemas de referencia.

Los métodos geométricos son pertinentes para casos sencillos, debido a que no son sistemáticos, su estudio se limita a sistemas robóticos de menores grados de libertad. Los métodos que se basan en el cambio de los sistemas de referencia facilitan de una manera sistemática abordar la determinación del modelo cinemático directo del robot para dispositivos de mayor número de grados de libertad. Son frecuentemente utilizados, se desarrollan matrices de transformación homogénea para determinar sus parámetros generales.

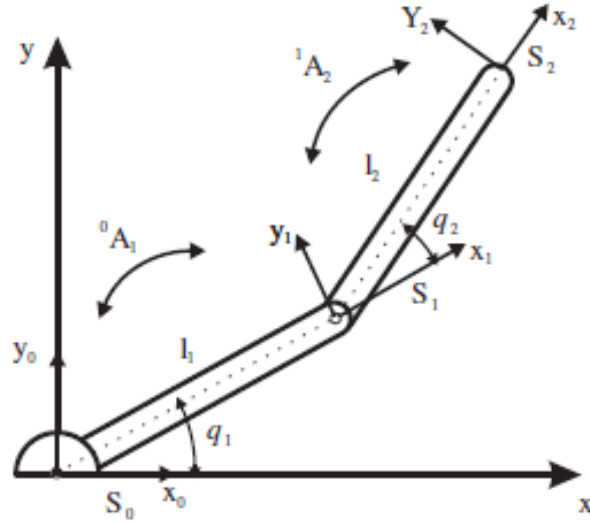


Figura 15. Agrupación de sistemas de referencia a cada eslabón del manipulador. Fuente: (Barrientos, 2007)

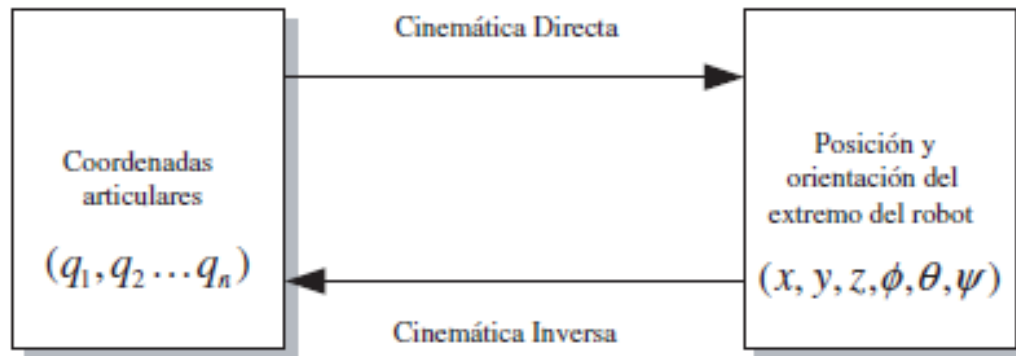


Figura 16. Correspondencia entre cinemática directa e inversa. Fuente: (Barrientos, 2007).

- **Determinación del modelamiento cinemático directo por medio de la aplicación del Algoritmo de Denavit Hartenberg.**

Se denomina algoritmo al conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que interactúan para calcular y solucionar problemas matemáticos.

Denavit y Hartenberg, en adelante D-H, con el objetivo de normalizar la determinación del conjunto de ecuaciones correspondiente a la cadena cinemática total, formularon en 1955 el procedimiento matricial que determina la localización de cada sistema de coordenadas $\{S_i\}$ en relación con cada eslabón i de una sucesión articulada.

Al definir los sistemas de coordenadas coligados a cada eslabón de acuerdo con la representación postulada por D-H, se podrá avanzar de un eslabón al siguiente por medio de cuatro transformaciones matriciales básicas que, de forma exclusiva, dependen de los parámetros geométricos del eslabón.

Es importante tener en cuenta que, generalmente una matriz de transformación homogénea se determina por seis (6) grados de libertad, el método de D-H permite disminuir dicho valor a cuatro (4), en eslabones rígidos, una vez definida la correcta elección de los sistemas de coordenadas del dispositivo.

Las cuatro (4) transformaciones básicas son un ciclo de rotaciones y traslaciones que permiten vincular el sistema de referencia del elemento $i-1$ con el sistema del elemento i . Es de importancia tener presente que para pasar del sistema $\{S_{i-1}\}$ al $\{S_i\}$ por medio de estas cuatro (4) transformaciones es funcional únicamente en el caso que los sistemas $\{S_{i-1}\}$ y $\{S_i\}$ sean determinados conforme con unas normas concretas que se evidencian en los capítulos correspondientes.

Las transformaciones descritas son:

1. Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i ; vector d_i $(0,0, d_i)$.
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector a_i $(a_i, 0,0)$.
4. Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Debido a que, el producto de matrices carece de propiedades conmutativas y al referirse al sistema móvil, las transformaciones se realizan en el orden indicado.

Por lo cual, se tiene que:

$${}^{i-1}A_i = Rotz(\theta_i) T(0,0,d_i) T(a_i,0,0) Rptx(\alpha_i) \quad (2.1)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En el cual, θ_i , d_i , a_i , α_i son las determinaciones paramétricas *D-H* del eslabón *i*. De esta manera, al definir los parámetros θ_i , d_i , a_i , α_i se obtienen las matrices ${}^{i-1}A_i$ y relacionar de esta manera todos y cada uno los eslabones del robot. (Barrientos, 2007).

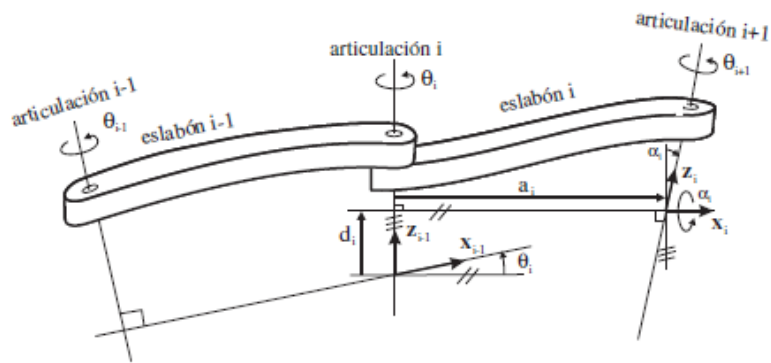


Figura 17. Parámetros de D-H para eslabón giratorio. Fuente (Barrientos, 2007).

b. Cinemática inversa

Determina la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

A diferencia del problema cinemático directo, en el que independientemente de la configuración del robot, se puede estudiar de una manera sistemática la configuración a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, debido a que, en este el procedimiento de obtención de las ecuaciones está determinado por la configuración del robot.

Entre la clase de soluciones de forma cerrada para determinar la cinemática inversa, se resaltan dos métodos para hallar la solución: algebraico y geométrico.

Los dos métodos son similares, debido a que cualquier método geométrico a considerar se aplica por medio de expresiones algebraicas. Probablemente, los métodos difieren en el enfoque. Una conclusión destacable reciente en cinemática es que, de acuerdo con la definición de solubilidad de los referentes teóricos, todos los sistemas con articulaciones angulares y prismáticas, los cuales posean un total de seis grados de libertad en la misma cadena en serie, pueden ser resueltos. Sin embargo, este resultado general es numérico. Los sistemas manipuladores con seis grados de libertad pueden ser resueltos analíticamente sólo en casos particulares. Dichos robots para los que existe una solución de forma cerrada (o analítica) se identifican por tener varios ejes de articulación perpendiculares o varias α_i con valor igual a 0 o ± 90 grados. (Barrientos, 2007).

- **Método Geométrico para cinemática inversa.**

El uso y aplicación de las ecuaciones cinemáticas de un robot para definir las características generales que proporcionan un posicionamiento deseado del efector final determina la cinemática inversa del sistema.

Este método es apropiado para manipuladores de reducidos grados de libertad o en el caso de considerar únicamente los primeros grados de libertad del sistema con el fin de posicionar el extremo de este.

El método consiste en encontrar la suficiente cantidad de relaciones geométricas en las que actuarán las coordenadas del extremo del robot, las coordenadas articulares y los parámetros físicos de sus eslabones.

- Robot de tres Grados De Libertad.
- Coordenadas P_x, P_y, P_z
- Robot con estructura planar.

La suma de las variables articulares es la orientación del último eslabón:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2.2)$$

$$q_1 = \arctan \frac{P_y}{P_x} \quad (2.3)$$

Teniendo en cuenta r y haciendo uso del teorema del coseno, se tendrá:

$$r^2 = P_x^2 + P_y^2 \quad (2.4)$$

$$r^2 + P_z^2 = I_2^2 + I_3^2 + 2 * I_2 * I_3 * \cos q_3 \quad (2.5)$$

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + I_2^2 + I_3^2}{2 * I_2 * I_3} \quad (2.6)$$

Esta expresión permite obtener q_1 en función del vector de posición del extremo P. Sin embargo, por motivos de ventajas computacionales, es más conveniente utilizar la expresión de arco tangente en lugar del arco seno. Puesto que:

$$\text{en } q_3 = \pm(1 - \cos^2 q_3)^{1/2} \quad (2.7)$$

Se tendrá que:

$$q_3 = a \text{ tang}(\pm(1 - \cos^2 q_3)^{1/2} \cos q_3) \quad (2.8)$$

$$\cos q_3 = \frac{(px)^2 + (py)^2 + (pz)^2 - (I_2)^2 - (I_3)^2}{2(I_2)(I_3)} \quad (2.9)$$

El valor calculado de q_2 , se obtiene a partir de la diferencia entre β y a :

$$q^2 = \beta - a \quad (2.10)$$

Siendo:

$$\beta = \arctg\left(\frac{P_x}{r}\right) \arctg\left(\pm \frac{P_x}{(P_x)^2 + (P_y)^2}^{1/2}\right) \quad (2.11)$$

$$a = \arctg\left(\frac{I_3 \text{ sen } q_3}{I_2 * I_3 \cos q_3}\right) \quad (2.12)$$

Luego:

$$q_2 = \arctg \left(\frac{P_z}{\pm((Px)^2 + (Py)^2)^{1/2} - \arctg \left(\frac{I_3 \operatorname{sen} q_3}{I_2 + I_3 \cos q_3} \right)} \right) \quad (2.13)$$

Una vez más, los dos posibles valores determinados por la elección del signo dan lugar a dos resultados distintos de q_2 , los cuales, corresponden a las configuraciones codo arriba y abajo. (Craig, 2006)

c. Cinemática Diferencial

La matriz Jacobina de un sistema robótico que relaciona el vector de velocidades articulares con el vector de velocidades indicado en un espacio distinto. Este espacio se puede seleccionar por diferentes procedimientos. Es necesario tener en cuenta la correspondencia con las velocidades de la colocación del extremo del robot, siendo ésta la posición y orientación indicada con base a sus coordenadas cartesianas y a sus ángulos de Euler.

Otra manera es la de determinar la relación entre las velocidades articulares, con los vectores de velocidad lineal y angular ($v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$) con los cuales se genera el movimiento del extremo del robot, descritos en un sistema de referencia específico, como el del inicio del sistema, por ejemplo. La correlación entre las velocidades articulares y las lineal-angular del extremo es obtenida mediante la matriz Jacobiana geométrica o Jacobiana del manipulador.

Por medio de los dos métodos, es posible determinar una definición de los parámetros de las velocidades del robot en su extremo, a partir de las medidas de las velocidades de cada articulación por medio de la matriz Jacobiana directa.

A su vez, la matriz Jacobina inversa posibilita conocer las velocidades articulares necesarias para obtener un vector concreto de velocidades del extremo. (Barrientos, 2007)

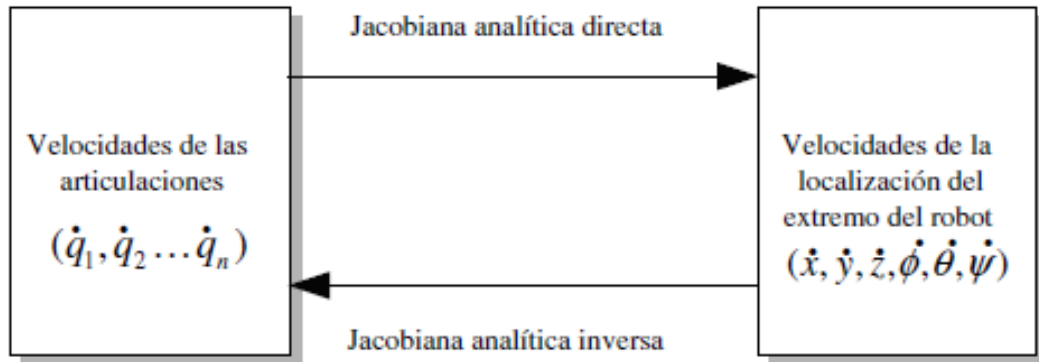


Figura 18. Jacobiana analítica directa e inversa. Fuente: (Barrientos, 2007).

2.3.2. Cinética del Robot.

La cinética se encarga de analizar movimientos bajo la influencia de fuerzas, es decir, la cinética toma en consideración también las causas del movimiento. Para describir la evolución espacial y temporal de un sistema mecánico sobre el que actúan fuerzas externas, se aplican ecuaciones de movimiento. Este tipo de ecuaciones se suele componer de un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden.

La base de la cinética son las leyes de Newton del movimiento:

1ª ley. Principio o ley de inercia:

- Sin la aplicación de una fuerza externa, un cuerpo se mantiene en reposo o en un movimiento rectilíneo uniforme.

- Inercia: un cuerpo solo cambia su estado de movimiento debido a la influencia de fuerzas externas.

2ª ley. Principio de acción:

- La fuerza aplicada al cuerpo y la aceleración son proporcionales entre sí.
- La relación entre la fuerza aplicada y la aceleración conseguida es una magnitud constante para todos los cuerpos: su masa.

Ley fundamental de la dinámica:

$$F = m \cdot a \quad (2.14)$$

En donde: Fuerza = masa · aceleración

3ª ley. Principio de acción y reacción:

Las fuerzas de reacción entre dos puntos de masa son de igual magnitud, opuestas y colineales. (ingeniería., 2008)

Acción = Reacción.

2.3.3. Momento de inercia de masa.

En la traslación, se habla de la inercia de un cuerpo; en la rotación, dicha inercia se corresponde con el momento de inercia o con el momento de inercia de masa.

Cuando el movimiento de rotación de un cuerpo rígido se ve modificado en un eje dado, el cuerpo opone una resistencia a dicha modificación. Esta resistencia viene dada por el momento de inercia de masa. En este sentido, el comportamiento del cuerpo depende de la distribución de su masa en relación con el eje de rotación, que permite calcular el momento de inercia de masa:

$$J = \frac{M}{\alpha} \quad (2.15)$$

$$J = r^2 \Delta m \quad (2.16)$$

Donde:

J = Momento de inercia de masa.

M = Par motor, F fuerza.

r = Radio.

α = Aceleración angular.

Δm = Punto de masa circunferencial.

2.3.4. Motores eléctricos.

Son utilizados para entregar la energía motriz principal en las articulaciones del sistema electromecánico, los motores de corriente directa (CD) por utilizar, funcionan con una fuente de energía que entrega la batería de 10V.

Estos servomotores permiten ajustar la velocidad de funcionamiento, ajustando el voltaje aplicado al motor por medio del sistema de control. El sentido de rotación es alterable al invertir la polaridad del voltaje aplicado.

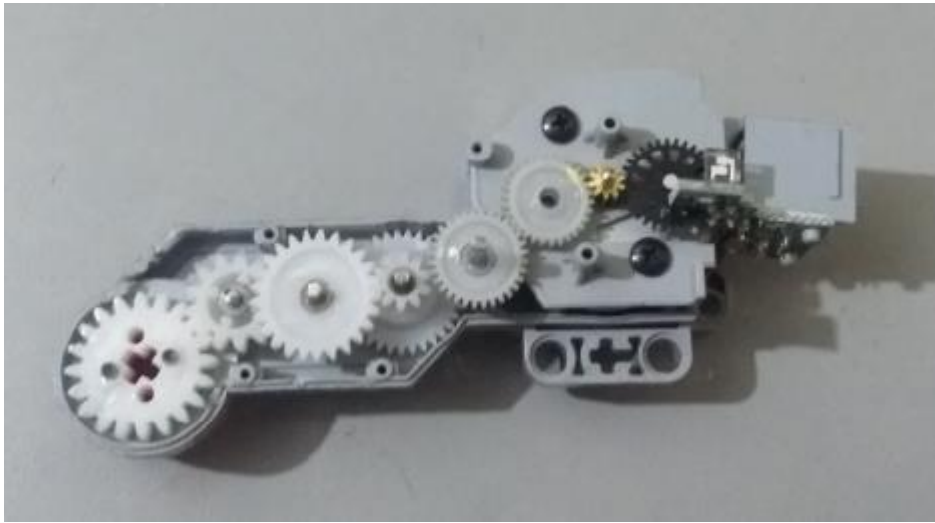


Figura 19. Diseño interno de Motor Grande EV3. Fuente: (Propia).

Es posible controlar los parámetros de aceleración y desaceleración para proporcionar el tiempo de respuesta requerido para el sistema. El torque puede ser controlado realizando la variación en la intensidad de corriente aplicada al actuador (Mott, 2016).

Es posible relacionar los parámetros de torque de operación (momento), velocidad de operación (velocidad angular) y especificación de potencia (potencia mecánica), por medio de la aplicación de la ecuación:

$$W = \tau(Nm) * \omega(rad/s) \quad (2.17)$$

La cual relaciona:

$$potencia = torque * velocidad$$

2.3.5. Sistemas mecánicos de transmisión de potencia.

Está determinado por un par o más de engranajes que interactúan entre sí para transmitir potencia. Dependiendo de la configuración del sistema, dependerá la velocidad de giro del engrane de salida del tren de engranes definido por la relación de velocidad.

La velocidad lineal de un punto que está rotando, se determina haciendo uso del valor de la distancia R del punto respecto a su centro de rotación y la velocidad angular (ω):

$$v_t = R\omega \quad (2.18)$$

Para dos engranes unidos y, definiendo el subíndice P para el piñón y G para el engrane, en un sistema de igual tamaño para ambos, se obtiene:

$$v_t = R_p \omega_p \quad (2.19)$$

$$v_t = R_G \omega_G \quad (2.20)$$

La relación de velocidad VR , se obtiene por:

$$VR = \frac{\omega_p}{\omega_G} = \frac{R_G}{R_p} \quad (2.21)$$

En términos generales, es conveniente expresar la relación de velocidad en el sistema, en términos del diámetro de paso de los elementos, las velocidades de giro o la relación del número de dientes de los engranes.

Es posible definir estas relaciones por medio de:

$$R_G = \frac{D_G}{2} \quad (2.22)$$

$$R_P = \frac{D_P}{2} \quad (2.23)$$

$$D_G = \frac{N_G}{P_d} \quad (2.24)$$

$$D_P = \frac{N_P}{P_d} \quad (2.25)$$

Teniendo en cuenta que:

$n_P =$ Velocidad de rotación del piñón (rpm)

$n_G =$ Velocidad de rotación del engrane (rpm)

Podemos definir las relaciones de transmisión mecánica cómo:

$$VR = \frac{\omega_P}{\omega_G} = \frac{n_P}{n_G} = \frac{R_G}{R_P} = \frac{D_G}{D_P} = \frac{N_G}{N_P} = \frac{\text{velocidad}_P}{\text{velocidad}_G} = \frac{\text{tamaño}_P}{\text{tamaño}_G} \quad (2.26)$$

Por lo general, los impulsores de engrane son reductores de velocidad, puesto que, su velocidad de salida es más baja que la velocidad de entrada.

El valor para un tren de engranes en un sistema mecánico se establece mediante la relación obtenida entre las velocidades de entrada y salida, así:

$$VR_1 = \frac{n_A}{n_B} \quad (2.27)$$

$$VR_2 = \frac{n_C}{n_D} \quad (2.28)$$

$$TV = (VR_1)(VR_2) = \frac{n_A}{n_B} \frac{n_C}{n_D} \quad (2.29)$$

Reduciendo, la relación de transmisión se obtiene por:

$$TV = \frac{n_A}{n_D} \quad (2.30)$$

En el diseño de dispositivos de transmisión mecánica, se recomienda postular la relación de transmisión en términos del número de dientes de cada engrane, con el fin de manejar valores enteros.

- **Engranés Rectos:**

Son componentes cilíndricos dentados, o de talla recta, son empleados para realizar la transmisión de movimientos paralelos a un eje de rotación. El engrane recto es el más sencillo de todos los tipos, en un sistema de transmisión de potencia, los dientes del engrane impulsor empujan a los dientes impulsados, aplicando fuerza perpendicular al radio del eje, transmitiendo un torque que a su vez trasfiere potencia.



Figura 20. Engrane LEGO, diseño en SolidWorks. Fuente: (Propia).

- **El tornillo sinfín**

Es un sistema de transmisión mecánico que es utilizado para transferir potencia y movimiento entre dos ejes que no se intersecan, con un ángulo de 90° entre ellos, por lo general.

El conductor del sistema está determinado por el sentido de rotación de la corona o gusano del tornillo sinfín, dependiendo del sentido de giro del sistema y del sentido de corte de los dientes (derecha o izquierda) realizado durante el proceso de diseño y fabricación. Los engranes de tornillo sinfín se hacen de forma que los dientes de uno o de ambos elementos se envuelvan de manera parcial alrededor del otro. Estos engranes son denominados engranajes de envolvente simple o doble.

Los engranajes sinfín se utilizan en especial cuando las relaciones de velocidad de los dos ejes son muy elevadas, de 3 o más. (Richard G. Budynas, 2008)



Figura 21. Tornillo sin fin, Diseño en SolidWorks. Fuente. (Propia).

La relación de velocidad en un sistema de tipo tornillo sin fin – engrane recto, se determina por:

$$VR = \frac{\text{velocidad del gusano}}{\text{velocidad del engrane}} = \frac{n_W}{n_G} = \frac{N_G}{N_W} \quad (2.31)$$

- **Engrane planetario o epicicloidal:**

El sistema de engrane epicicloidal está conformado por uno o más engranajes externos (satélites) que giran sobre un engranaje central o planeta.

Por lo general, los satélites se instalan en un sistema móvil que les facilita el movimiento de rotación respecto con el engrane central (solar o planeta). Este tipo de sistemas pueden incorporar un engranaje corona, o anular externo, que engrana con los planetas.

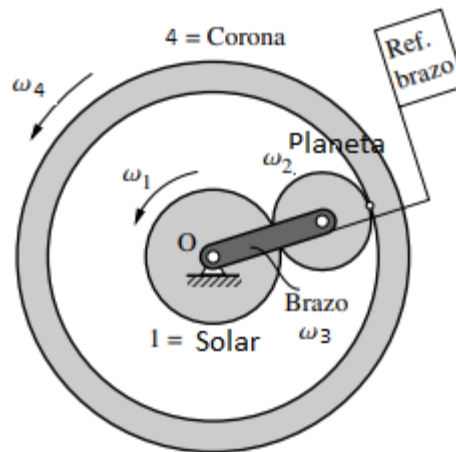


Figura 21. Tren epicicloidal simple. Fuente (Foix & Costa, 2001).

El sistema más sencillo de tren satelital simple está conformado por los elementos a continuación:

- a) Una rueda central o planeta que gira alrededor del punto central O.
- b) Un brazo porta-satélites que gira alrededor de O y que en su extremo arrastra una rueda (satélite) que puede girar respecto al brazo.
- c) Una corona con dentado interior que gira alrededor de O.

Las expresiones genéricas de la relación de velocidades de giro del tren de engranes planetarios se pueden obtener dependiendo de los siguientes casos:

a. El engrane corona se encuentra fijo ($\omega_4 = 0$).

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = 2 \left[1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right] = \left[1 + \frac{Z_4}{Z_1} \right] \quad (2.32)$$

b. El engrane solar está fijo ($\omega_1 = 0$).

$$\frac{\omega_4}{\omega_3} = 2 \left[\frac{Z_1}{Z_4} + \frac{Z_2}{Z_4} \right] = \left[1 + \frac{Z_1}{Z_4} \right] \quad (2.33)$$

c. El porta-planetas está fijo ($\omega_3 = 0$).

$$\frac{\omega_4}{\omega_1} = \left[\frac{Z_1}{Z_4} \right] \quad (2.34)$$

d. Que se pueda fijar una relación entre las velocidades del engrane solar y del engrane corona ($\omega_4 = kr \cdot \omega_1$).

$$\frac{\omega_1}{\omega_3} = \left[\frac{Z_1 + Z_4}{Z_1 + Kr Z_4} \right] = \left[1 + \frac{Z_4}{Z_1} \frac{1}{1 + Kr \frac{Z_4}{Z_1}} \right] \quad (2.35)$$

Donde Kr representa la velocidad en el anillo.

Todas las variantes presentadas en un sistema de engranaje satelital se analizan a partir de la observación desde la referencia relativa brazo.

- **Software de diseño SolidWorks.**

El programa de automatización de diseño mecánico SolidWorks es un software CAD que permite a diseñadores en la industria croquizar ideas de forma rápida, experimentar con diversos parámetros y mediciones, producir modelos y dibujos técnicos detallados.

Emplea un procedimiento de diseño en 3D. Comenzando por el croquis inicial y hasta la obtención del resultado, al diseñar una pieza se está creando un modelo en tres dimensiones. Utilizando este modelo, se pueden realizar gráficos en dos dimensiones o componentes de relaciones de posición que consten de piezas o subensambles para crear ensambles en tres dimensiones. A su vez, es posible crear diseños en 2D teniendo como referencia ensamblajes en 3D.

Una de las características más variables del programa SolidWorks es su capacidad paramétrica, reflejando cualquier cambio realizado en una pieza en todos los dibujos o ensamblajes ligados a dicha pieza.

SolidWorks SimulationXpress ofrece una herramienta de uso sencillo para el análisis de tensiones, ayuda a los usuarios a reducir los costos y el tiempo de lanzamiento al mercado de los productos gracias a la realización de pruebas informáticas de los diseños, evitando así tener que hacer pruebas de campo. (Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 1995-2018)

2.4. Software de análisis matemático MATLAB.

Matlab es una herramienta para resolver problemas de cálculo; El nombre Matlab viene de "*matrix laboratory*" (laboratorio matricial).

Es un programa de alto desempeño desarrollado para hacer cálculos técnicos. Combina de manera integral el cálculo, la visualización y la programación en un

ambiente fácil de utilizar donde los problemas y las soluciones se expresan en una notación matemática. Esto permite solucionar problemáticas computacionales de manera eficiente, en especial, aquellas que involucren vectores y matrices, en un tiempo mucho menor al requerido para escribir un programa en un lenguaje escalar no interactivo tal como Fortran o C. (Elizondo, 2002).

MATLAB es un entorno robusto para álgebra lineal y presentación gráfica, disponible en una amplia gama de plataformas informáticas. La funcionalidad principal se puede ampliar mediante cajas de herramientas específicas de la aplicación. *Robotics Toolbox* proporciona muchas funciones que son necesarias en robótica y aborda áreas como cinemática, dinámica y generación de trayectoria. Los *Toolbox* son útiles para la simulación, así como para analizar resultados de experimentos con robots reales, convirtiéndose en una útil herramienta educativa.

La caja de herramientas se basa en un método general para representar la cinemática y la dinámica de manipuladores de enlace en serie por matrices de descripción. Estos comprenden, en el caso más simple, Los parámetros Denavit y Hartenberg del robot pueden ser creados por el usuario para cualquier enlace serial del manipulador.

Las características del manipulador se pueden elaborar, aumentando la matriz, para incluir enlaces, motores inerciales y parámetros de fricción. Dichas matrices proporcionan un medio somero para describir un modelo de robot y puede facilitar el intercambio de modelos robóticos en toda la comunidad de investigación. Esto permitiría comparar los resultados de la simulación de una manera mucho más significativa de lo que se hace actualmente en la literatura. La *Toolbox*, a su vez, proporciona funciones para manipular tipos de datos como vectores, transformaciones homogéneas y cuaterniones unitarios que se requieren para representar la posición y orientación tridimensional.

Las rutinas, por lo regular, se escriben de manera directa, o en forma de libro de texto, para fines pedagógicos, en lugar de la máxima eficiencia computacional. (Corke, 2016)

En robótica se utiliza Matlab y *Simulink* para diseñar y ajustar algoritmos, modelar sistemas del mundo real y generar código automáticamente, todo desde un mismo entorno de software.

Estos algoritmos soportan trabajos relacionados con robots articulados. *Robotics System Toolbox* Define su modelo de robot utilizando la clase, que se compone de cuerpos rígidos como elementos estructurales y articulaciones para el acoplamiento y el movimiento. *RigidBodyTree*, esta aplicación de robot posee restricciones cinemáticas y propiedades dinámicas aplicables a los dispositivos analizados.

Puede realizar cálculos de dinámica y cinemática inversa en modelos diversos de robots (The MathWorks, 1994-2019).

La GUI (*graphical user interface*), o interfaz gráfica de usuario, es el contenido gráfico mediante el cual se visualiza información del equipo en una pantalla. Es un ambiente de programa visual disponible en Matlab para diseñar y ejecutar programas que necesiten una entrada permanente de datos, tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++ (The MathWorks, 1994-2019)

CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO.

En este capítulo se plantea el estudio de diseño mecánico, teniendo en cuenta la fundamentación teórica, referente a los parámetros y requerimientos establecidos para la implementación de dispositivos robóticos industriales de manipulación.

La configuración general del sistema electromecánico comprende: grados de libertad, configuración mecánica, análisis de parámetros físicos y programación de su funcionamiento, para que el prototipo propuesto cumpla con las tareas a desarrollar.

3.1. Parámetros de diseño.

El sistema electromecánico objeto del presente proyecto está compuesto por segmentos interconectados mediante articulaciones, las cuales están a su vez, conectadas a los motores disponibles, por medio de sistemas reductores y multiplicadores de potencia que generan el movimiento del prototipo.

El dispositivo está construido con herramientas didáctico-pedagógicas LEGO *education*, donde su composición son ladrillos fabricados en su mayoría, con material termo plástico de alta resistencia ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) pertenece al kit LEGO *Education MINDSTORMS EV3*, y programado con el software especializado propio de la marca, para la automatización y control de dispositivos robóticos.

Elección basada en cualidades necesarias para el funcionamiento, adaptabilidad y control de dispositivos electromecánicos. Este recurso es compatible con el del ambiente de aprendizaje de la universidad Antonio Nariño, descrito previamente.

Cada pieza por utilizar en la construcción del prototipo se encuentra bajo parámetros de diseño asistido por computador en entorno del programa SolidWorks. (Ver anexo No. 2).

De igual manera, se aprovechan las herramientas de análisis de parámetros contenidas en el software.

Las piezas relevantes para utilizar en la construcción del prototipo se describen de manera detallada en el documento guía estudio elemental, el cual hace parte de la información técnica del kit LEGO *education MINDSTORMS EV3*. (anexo No. 3).

3.2. Morfología.

La constitución física de los manipuladores robóticos, en su mayoría, conservan la configuración de la anatomía humana, esto permite analizar la configuración del dispositivo, dependiendo de la función de cada una de sus partes.

3.2.1. Criterio de Grubler Kutzbach.

Teniendo en cuenta la geometría del dispositivo a construir, se definieron los eslabones y articulaciones para el sistema electromecánico. Para la comprobación de los grados de libertad se aplican los parámetros conceptuales del criterio:

$$n = s(r - p - 1) + \sum_i^p n_i \quad (3.1)$$

En donde los valores de los parámetros son:

- s : Para mecanismos en el plano será 3 y para mecanismos en el espacio será 6, depende de las características geométricas del espacio de trabajo.
- r : Representa la cantidad de eslabones.
- p : El número de articulaciones, descartando la articulación del origen.

- n_i : Son los grados de libertad relativos de cada articulación.
- n : Son los grados de libertad de todo el dispositivo.

$$s = 6 \quad r = 4 \quad p = 3 \quad n_i = 1$$

$$n = 6 * (4 - 3 - 1) + (4 * 1) \quad (3.2)$$

El resultado es: $n = 4 \text{ GDL}$.

3.2.2. Entorno de Trabajo.

El espacio de trabajo, que se define en ocasiones como espacio de trabajo efectivo, se define teniendo en cuenta las necesidades identificadas para la manipulación de los objetos y los posicionamientos máximos requeridos para su cumplimiento.

Este denominado espacio de trabajo del robot establece la zona en la cual el mecanismo puede trabajar.

Cuando se pretende estudiar un espacio de trabajo, lo más importante es parametrizar su forma y volumen, definir las dimensiones y la estructura.

Este parámetro nos permite identificar los alcances máximos requeridos para definir las trayectorias de funcionamiento final del dispositivo y las restricciones geométricas del sistema electromecánico.

A continuación, se describen los parámetros geométricos del entorno de trabajo:

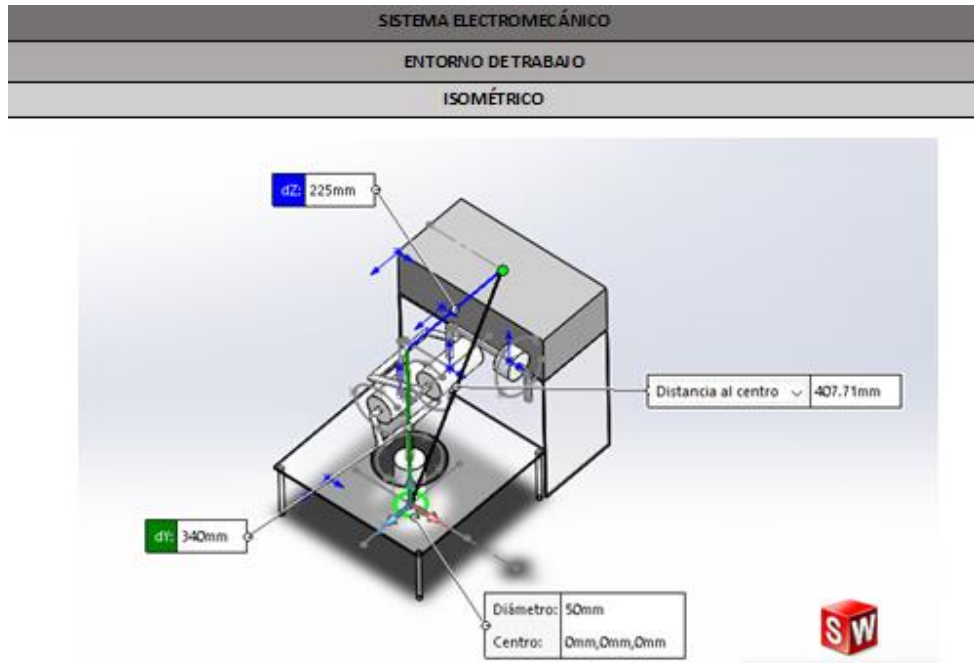


Figura 22. Vista Superior Área de Trabajo. Fuente: (Propia).

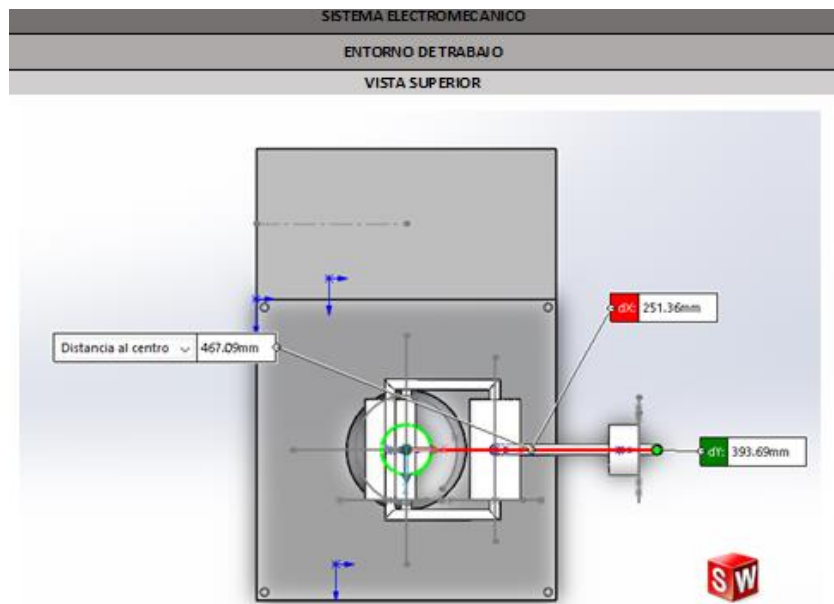


Figura 23. Vista Isométrica área de trabajo. Fuente:(Propia).

El prototipo está en capacidad de identificar una caja, haciendo uso de un sensor de color, tiene la funcionalidad de manipularla por medio de un brazo robótico y ubicarla en un posicionamiento específico.

El sistema cuenta con un manipulador electromecánico (brazo robótico) de 4 grados de libertad, 3 articulaciones y 1 efector. Los movimientos se identifican de la siguiente manera:

- Primer (GDL): Base o rotación.
- Segundo (GDL): Libertad articulación tipo hombro.
- Tercer (GDL): Articulación tipo codo.
- Cuarto (GDL): Articulación de rotación tipo muñeca.
- Efector: actuador final tipo pinza que le permite manipular los objetos a trasladar.

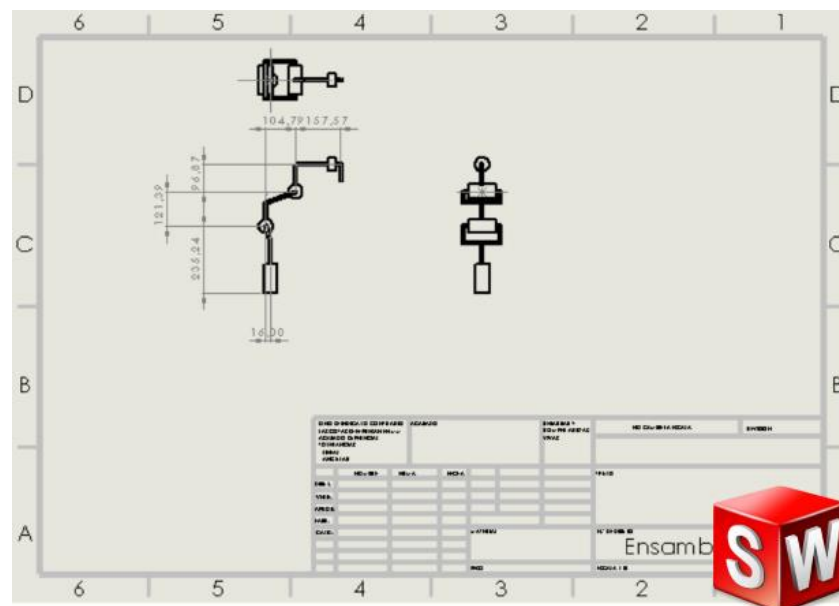


Figura 24. Esquema general de Diseño. Fuente:(Propia).

3.3. Descripción del proceso constructivo.

Después de ser analizados los parámetros básicos de diseño morfológico, se procede al prototipado de los eslabones y partes necesarias para la constitución física del sistema electromecánico, a su vez, el proceso se complementa con el diseño asistido por computador de los ensambles, conservando coincidencia en su estructura, cantidad de piezas y anatomía del prototipo.

3.3.1. Construcciones Previas.

Gracias a la versatilidad de las herramientas LEGO Education, las cuales permiten ensamblar y desensamblar de manera sencilla las construcciones, se logra prototipar diversas configuraciones del sistema electromecánico.

Estas pruebas permiten a su vez, determinar parámetros de funcionamiento, condiciones de trabajo, oportunidades de mejora en la implementación y uso de la herramienta, entre otros.

A continuación, se describe gráficamente la evolución cronológica del ejercicio constructivo, como referente de análisis y pruebas de funcionamiento.










PRUEBAS CONSTRUCTIVAS			
VERSIÓN 1			FECHA: 15/11/2019
			
VERSIÓN 2			FECHA: 25/11/2019
			
VERSIÓN 3			FECHA: 27/11/2019
			

Figura 25. Pruebas constructivas Fase inicial. Fuente: (Propia)

De igual manera, se genera la oportunidad de analizar a fondo sus componentes, ventajas y desventajas mecánicas y funcionalidad.

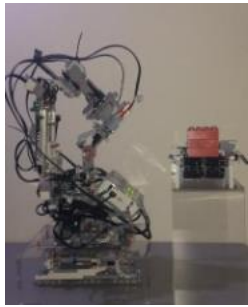
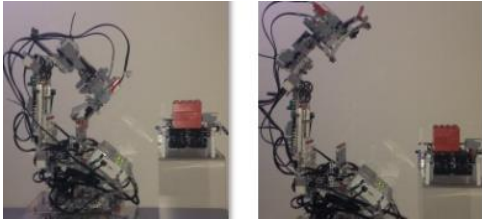
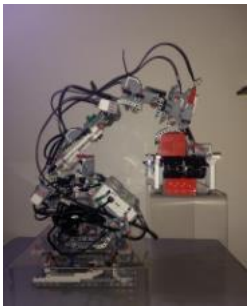

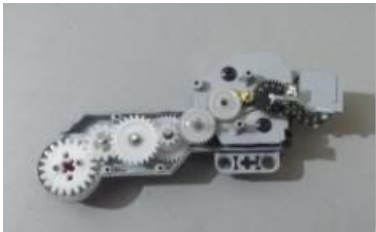

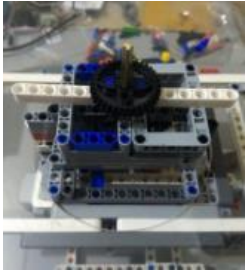
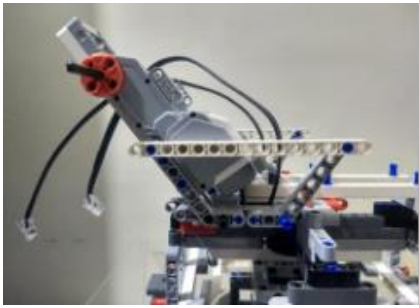
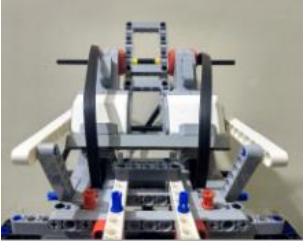
PRUEBAS CONSTRUCTIVAS		
VERSIÓN 4		FECHA: 4/12/2019
		
VERSIÓN 5		FECHA: 21/01/2020
		
		

Figura 26. Pruebas constructivas Fase Intermedia. Fuente: (Propia)

Durante esta fase, se determinan decisiones de diseño vitales para el correcto funcionamiento posterior del dispositivo y el alcance de los objetivos trazados en el presente trabajo integral de grado.

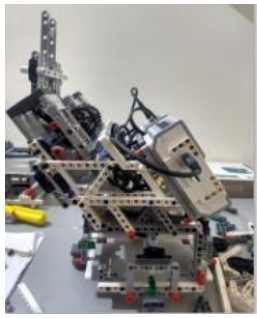




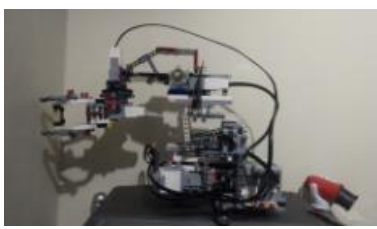
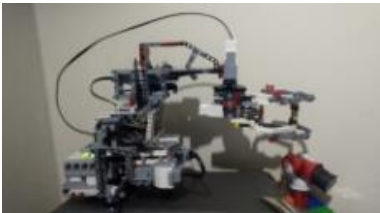
PRUEBAS CONSTRUCTIVAS			
VERSIÓN 6			FECHA: 30/03/2020
			
VERSIÓN 7			FECHA: 22/04/2020
			

Figura 27. Pruebas constructivas Fase final. Fuente: (Propia)

Del análisis de las pruebas constructivas se derivan los resultados funcionales finales, los cuales describen de manera detallada los procedimientos escogidos para cumplir con las condiciones mecánicas que satisfacen los objetivos de trabajo del prototipo.

3.3.2. Construcción Final.

Cada ensamble del prototipo final se analiza bajo enfoque de parámetros ingenieriles en el capítulo 4 del documento actual. En seguida, se describen los aspectos generales de la parametrización constructiva del sistema electromecánico:

- Primer (GDL): Base o rotación.

Se ubica en el primer eslabón y está constituido por 3 subensambles: base de giro, eslabón 1 parte 2 y eslabón 1 parte 3. Así mismo, se integra el uso de una base acrílica como elemento para fortalecer la estabilidad del sistema de rodamientos.

Base de giro (Eslabón 1-parte 1): se encarga de generar la rotación del manipulador desde la base, por medio de un sistema de transmisión mecánico:

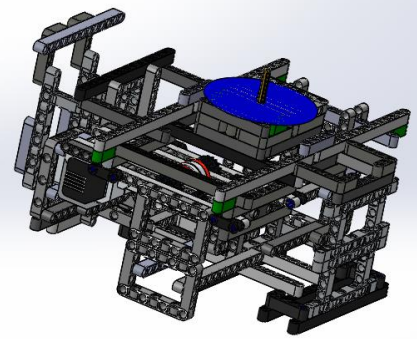
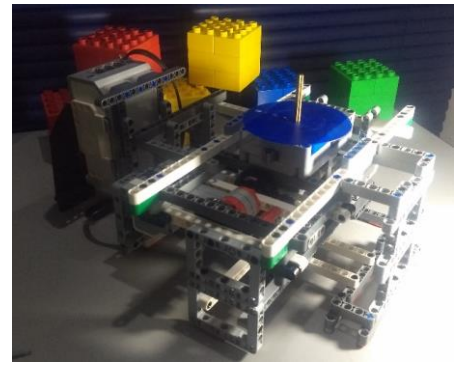
SISTEMA ELECTROMECÁNICO						
BASE DE GIRO		MATERIAL	PARÁMETROS FÍSICOS			
# de piezas:	146	ABS		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Ejes especiales:	1	Bronce Latón	Masa:	1084,9	(g)	gramos
Ladrillos de programación:	1	EV3	Volumen:	333063,66	(mm ³)	milímetros cúbicos
DISEÑO MECÁNICO						
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA			CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
						

Figura 28. Parámetros constructivo base de giro (1- parte1) Fuente:(Propia).

El sistema de relación de transmisión está constituido por el motor grande como conductor de un engrane cónico de 12 dientes, unido a un engrane biselado de 36 dientes (a.), que a su vez se encuentra conectado a un eje que transmite potencia a un sistema tornillo sin fin (b.) embonado a un engranaje recto de 24 dientes (c.).

El diseño de este sistema se duplica para la aplicación del sistema subsecuente.

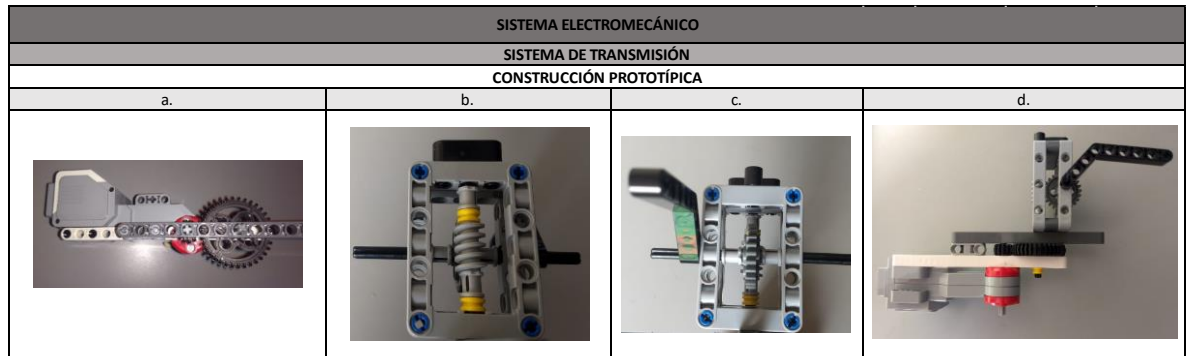


Figura 29. Sistema de transmisión. Fuente: (Propia).

La potencia final es transmitida directamente por medio de un eje, fabricado en bronce latón, mecanizado teniendo en cuenta los parámetros de diseño y dimensiones de los ejes LEGO Education:



Figura 30. Mecanizado de ejes especiales. Fuente:(Propia).

La decisión de la fabricación de los ejes especiales se determinó posterior al análisis de diversas pruebas de desempeño mecánico y relaciones de transmisión, teniendo en cuenta las propiedades de resistencia mecánica del ABS, ya que su ductilidad, al ser elevada, arroja resultados negativos durante las pruebas de funcionamiento, esto produce torsión en los ejes originales y deforma sus condiciones geométricas de fábrica.

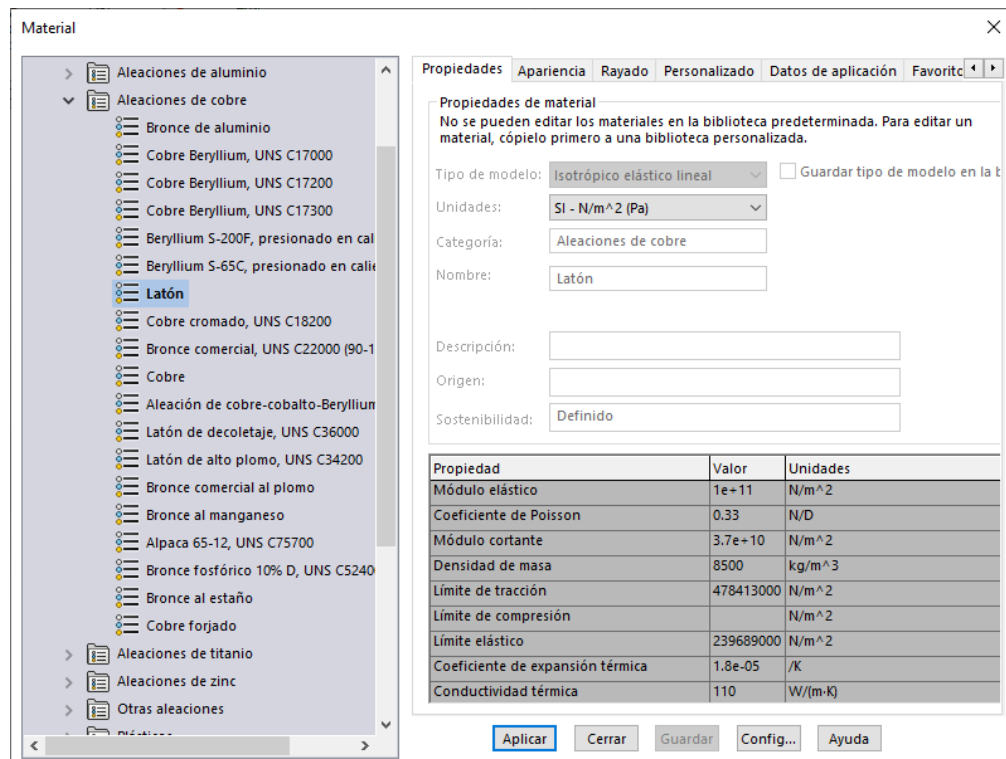


Figura 31. Propiedades del material Bronce Latón. Fuente: (SolidWorks).

Teniendo en cuenta los parámetros derivados del análisis de las curvas esfuerzo deformación de los materiales plásticos (ABS) de los que están compuestos los ejes LEGO y evidenciando los requerimientos de esfuerzo debido a las cargas dinámicas de trabajo para el dispositivo, se fabrican los ejes a reemplazar con Latón (conocido como Bronce Latón), una aleación que se compone principalmente de cobre (60%) y zinc (40%), posee características mecánicas que satisfacen las condiciones de

trabajo a las que se someten los componentes durante las pruebas de funcionamiento mecánico.

En la industria se utiliza frecuentemente este material para aplicaciones mecánicas por su bajo costo y fácil mecanizado:



SISTEMA ELECTROMECAÁNICO								
EJE ESPECIAL				PARÁMETROS FÍSICOS				
	LONGITUD	SÍMBOLO	UNIDAD		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	MATERIAL
# 12	96	(mm)	milímetros	Masa:	6,55	(g)	gramos	BRONCE LATÓN
				Volumen:	770,33	(mm ³)	milímetros cúbicos	
# 7	71	(mm)	milímetros	Masa:	11,25	(g)	gramos	
				Volumen:	1323,66	(mm ³)	milímetros cúbicos	
DISEÑO MECÁNICO								
PROTOTIPO								
 <p>Eje_módulo_7</p>				 <p>Eje_módulo_12</p>				

Figura 32. Ejes especiales. Fuente: (Propia).

A su vez, se integra la base de acrílico de medio impacto con el fin de generar soporte y estabilidad en el proceso de traslación del sistema electromecánico.

Esta pieza fue diseñada teniendo como referente el entorno de trabajo y construida por personal especializado en la producción de elementos varios fabricados en dicho material.

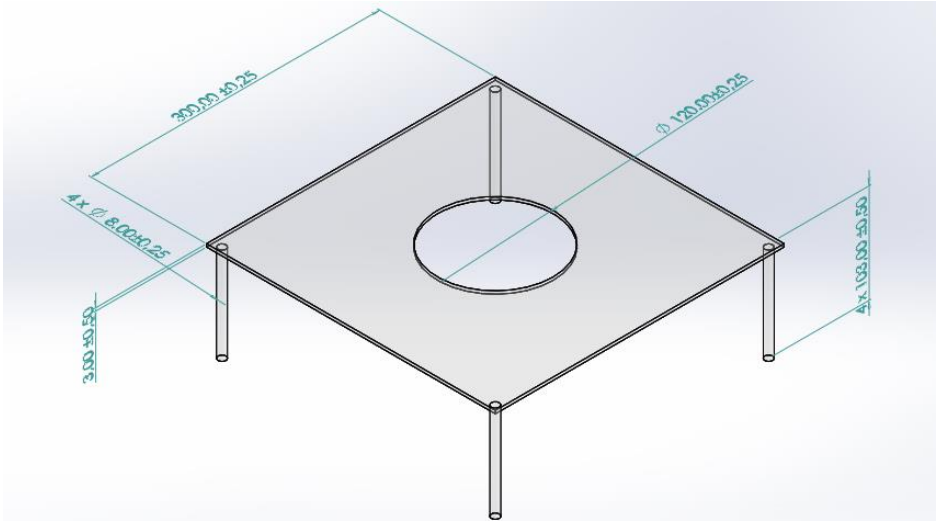
SISTEMA ELECTROMECÁNICO							
BASE ACRÍLICA							
# de piezas:	5			Material:	Acrílico		
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS				PARÁMETROS FÍSICOS			
	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Altura	103	(mm)	milímetros	Masa:	307,41	(g)	gramos
Lado de base	300	(mm)	milímetros	Volumen:	256176,99	(mm ³)	milímetros cúbicos
Ancho de lámina	3	(mm)	milímetros	Límite de tracción:	73000000	(Kg/mm ²)	Kilogramo por milímetro cuadrado
Diámetro	120	(mm)	milímetros				
DISEÑO MECÁNICO							
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA							
							

Figura 33. Parámetros constructivos base acrílica. Fuente: (Propia)

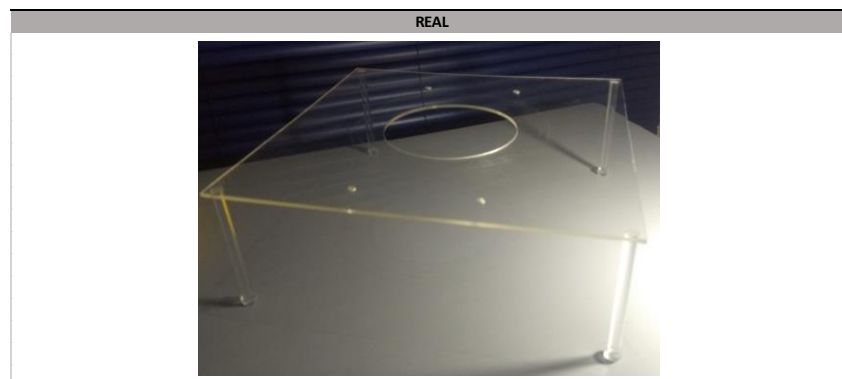


Figura 34. Base Acrílica, construcción real. Fuente: (Propia).

Base de giro (Eslabón 1-parte 2): complementa la rotación del manipulador mediante un sistema de estabilización de 6 cojinetes, interactuando con la base acrílica. El subsistema, en su parte superior, genera la potencia para alimentar el eslabón 2 del sistema general.

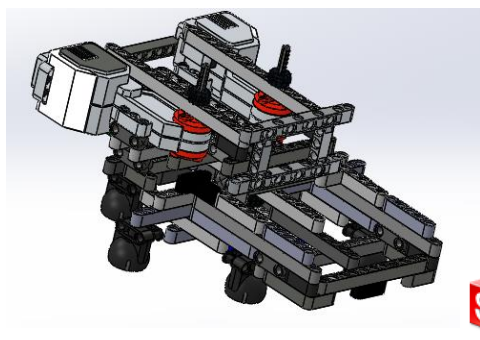

SISTEMA ELECTROMECAÁNICO							
ESLABÓN 1 PARTE 2			MATERIAL	PARÁMETROS FÍSICOS			
	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
# de piezas:	101	Ladrillos LEGO	N/A	Masa:	507,5	(g)	gramos
Motores:	Grande	2	L	N/A	Volumen:	241837,4	(mm ³) milímetros cúbicos
	Torque de arranque:	0,43	(N.m)	Newton*metro	Torque entregado :	0,86	(N.m) Newton*metro
Ladrillos de programación:	1	EV3	N/A				
DISEÑO MECÁNICO							
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA				CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
							

Figura 35. Parámetros constructivos eslabón (1 -parte 2). Fuente:(Propia).

- Segundo (GDL):

Articulación tipo hombro, base de giro (Eslabón 1-parte 3): este componente recibe la potencia por medio de la transmisión de 2 motores grandes que, de manera independiente, están conectados a un tren de engranajes con relación de 12 dientes en el conductor y de 36 dientes en el conducido, a su vez, este último transmite potencia a un sistema de tornillo sin fin, conectado a un engranaje recto de 24 dientes mediante un eje construido en bronce latón, el diseño final es el resultado

de diversas pruebas de funcionamiento realizadas con diferentes configuraciones mecánicas y se asemeja al utilizado en el sistema de la base de giro, duplicando la potencia de salida.

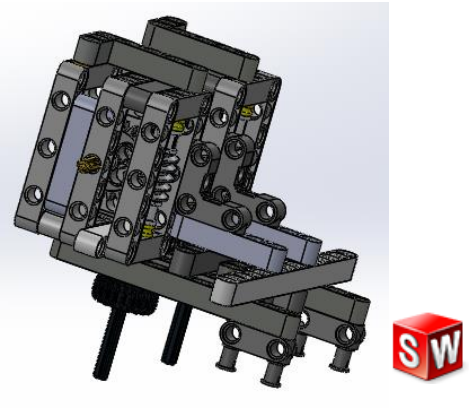
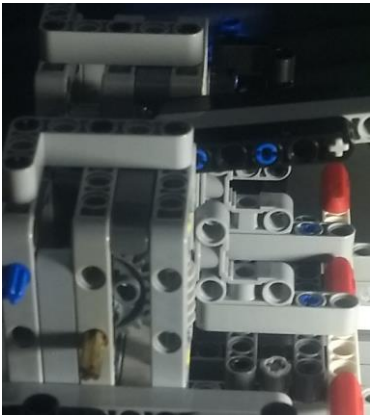
SISTEMA ELECTROMECÁNICO							
ESLABÓN 1 PARTE 3				PARÁMETROS FÍSICOS			
# de piezas:	53	Material:	ABS		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Relación de Transmisión:	24 a 1		Aumento	Masa:	28,3	(g)	gramos
Potencia de salida:	3,6	(N.m)	Newton*metro	Volumen:	88317,98	(mm ³)	milímetros cúbicos
DISEÑO MECÁNICO							
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA				CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
							

Figura 36. Parámetros constructivos eslabón (1-parte 3). Fuente:(Propia).

Este eslabón se conecta a su salida con el eslabón 2 por medio de dos ejes especiales #7, descritos previamente.

En el gráfico a continuación, se expone el desarrollo total del conjunto de subensambles que constituyen el eslabón 1, base de giro compuesta por eslabón 1 parte 1; eslabón 1 parte 2; eslabón 1 parte 3, además de base acrílica y dos ejes de rotación en bronce latón para el empalme mecánico con el eslabón 2.

- Eslabón 1:

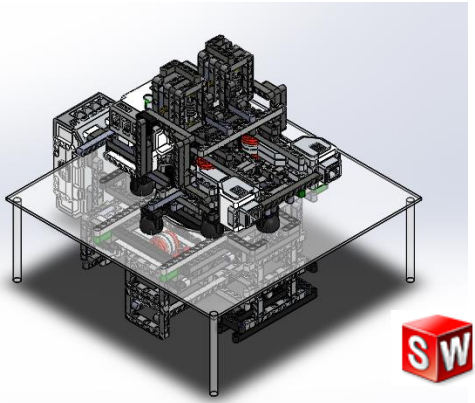

SISTEMA ELECTROMECAÁNICO						
ESLABÓN 1		MATERIAL	PARÁMETROS FÍSICOS			
# de piezas:	244	ABS	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	
Ejes especiales:	3	Bronce Latón	Masa:	1972,2	(g)	gramos
Ladrillos de programación:	2	EV3	Volumen:	1069325,79	(mm ³)	milímetros cúbicos
DISEÑO MECÁNICO						
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA			CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
						

Figura 37. Parámetros constructivos eslabón No. 1. Fuente:(Propia).

- Tercer (GDL):

Articulación tipo codo. Conjunto de elementos constructivos configurado para recibir potencia del sistema del eslabón anterior. Entrega potencia de un motor mediano por medio de la relación de transmisión de 24:1 en un sistema tornillo sinfín – engrane recto.

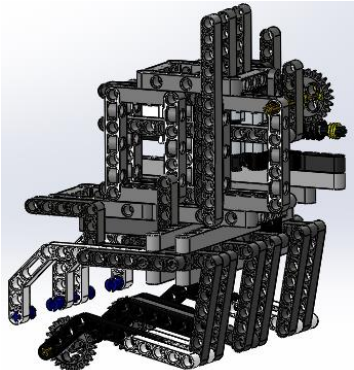

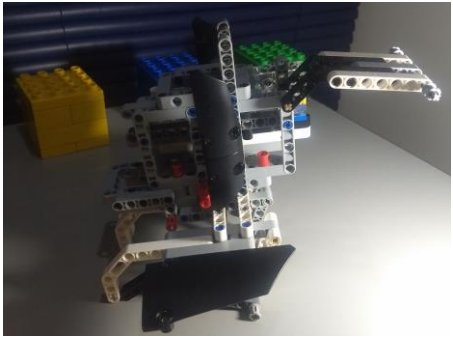
SISTEMA ELECTROMECAÁNICO						
ESLABÓN 2		MATERIAL	PARÁMETROS FÍSICOS			
# de piezas:	93	ABS	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	
			Masa:	282,7	(g)	gramos
Ejes especiales:	1	Bronce Latón	Volumen:	177030,99	(mm ³)	milímetros cúbicos
DISEÑO MECÁNICO						
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA			CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
 						

Figura 38. Parámetros constructivos eslabón No. 2. Fuente:(Propia).

- Cuarto (GDL):

Ubicado a la salida del eslabón 3. Está compuesto por un motor mediano y un engranaje planetario que permite el cambio posicional del efector al transmitir pares más elevados a este, su forma es compacta, permitiendo la distribución de torque en diferentes puntos por medio de los satélites, manteniendo la dirección de giro del motor conductor:

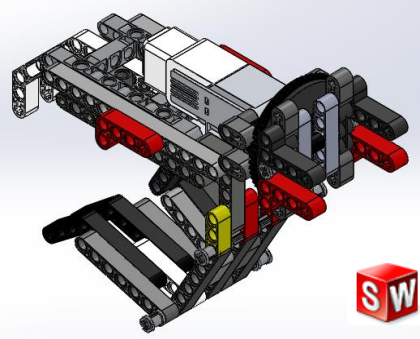

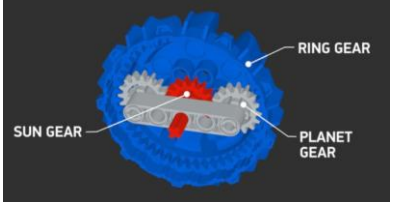

SISTEMA ELECTROMECÁNICO							
ESLABÓN 3				PARÁMETROS FÍSICOS			
# de piezas:	53	Material:	ABS	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	
Relación de Transmisión:	4 a 1		Aumento	Masa:	150,2	(g)	gramos
Potencia de salida:	0,6	(N.m)	Newton*metro	Volumen:	111835,25	(mm ³)	milímetros cúbicos
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA				CONSTRUCCIÓN SIMPLIFICADA			
							
SISTEMA DE TRANSMISIÓN							
							

Figura 39. Parámetros constructivos eslabón 3. Fuente:(Propia).

- Efector final:

Articulación de rotación, conforma el eslabón 4 del prototipo que se encuentra ensamblado al efector tipo muñeca, está constituido por un actuador con configuración de sistema de pinza que permite capturar y manipular los objetos a trasladar. El motor mediano está conectado a un sistema tornillo sin fin y la salida de potencia está determinada por 2 engranes rectos de 24 dientes:

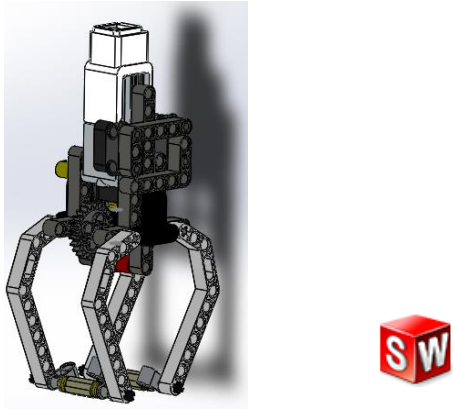

SISTEMA ELECTROMECAÁNICO					
EFECTOR FINAL		MATERIAL	PARÁMETROS FÍSICOS		
# de piezas:	49	ABS	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
			Masa:	107,5	(g) gramos
			Volumen:	58389,69	(mm ³) milímetros cúbicos
DISEÑO MECÁNICO					
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA			CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA		
					

Figura 40. Parámetros Constructivos Efector final. Fuente: (Propia).

El efector final es el dispositivo diseñado para la captura de los objetos, una vez finalizadas las pruebas de funcionamiento previas.

El resultado final del prototipo se muestra a continuación, en este se puede observar la configuración total del sistema electromecánico integrado objeto de estudio, su parametrización geométrica establecida para el análisis matemático y comprobación funcional:

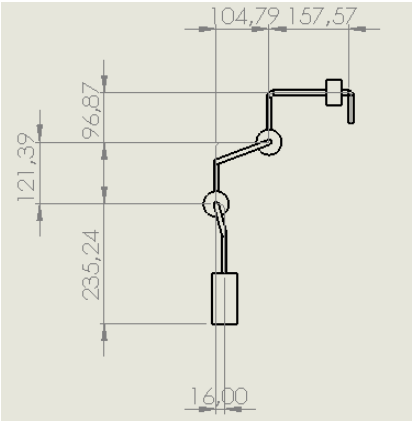
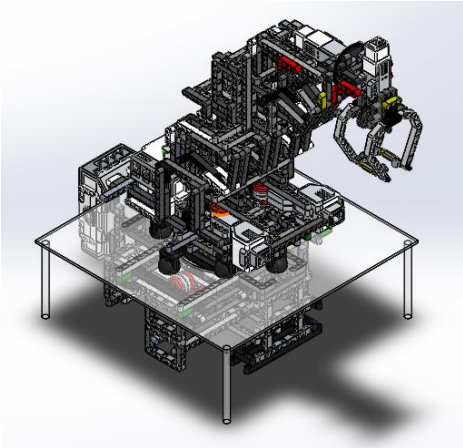

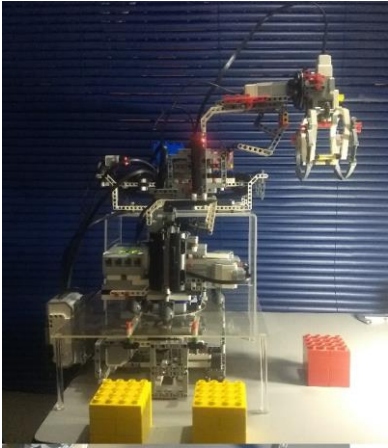
SISTEMA ELECTROMECAÁNICO				
4 GDL	PARÁMETROS FÍSICOS			
ANÁLISIS DIMENSIONAL	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	
	Masa:	3507,4	(g) gramos	
	Volumen:	1416581,72	(mm ³) milímetros cúbicos	
	Area de superficie:	2048372,08	(mm ²) milímetros cuadrados	
	Motor Grande:	3	L	N/A
	Motor Medio:	3	M	N/A
	Ladrillos de programación:	2	EV3	N/A
	# de Piezas:	605	EV3	N/A
DISEÑO MECÁNICO				
CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA	CONSTRUCCIÓN PROTOTÍPICA			
 				

Figura 41. Consolidado de parámetros Geométricos. Fuente: (Propia).

Durante la realización de la construcción virtual del sistema electromecánico, se reemplazan las uniones mecánicas reales por relaciones de posicionamiento en el software SolidWorks con el fin de hacer más eficiente el proceso de diseño mecánico.

La masa de cada eslabón fue medida por medio de una balanza de pesos deslizantes y comparada con los valores obtenidos por el software SolidWorks. Frente a esto, se seleccionan los valores de masa medidos, para el cálculo de los parámetros dinámicos del sistema electromecánico descritos en el capítulo 4 del presente documento.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO.

En este capítulo se evidencian los estudios y diseños respectivos al campo de la ingeniería aplicados al sistema electromecánico, teniendo como referente la información documental. Se realiza el análisis matemático del proceso y se desarrollan ejercicios de comprobación haciendo uso de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) diseñada para el sistema electromecánico objeto del proyecto (anexo No. 4).

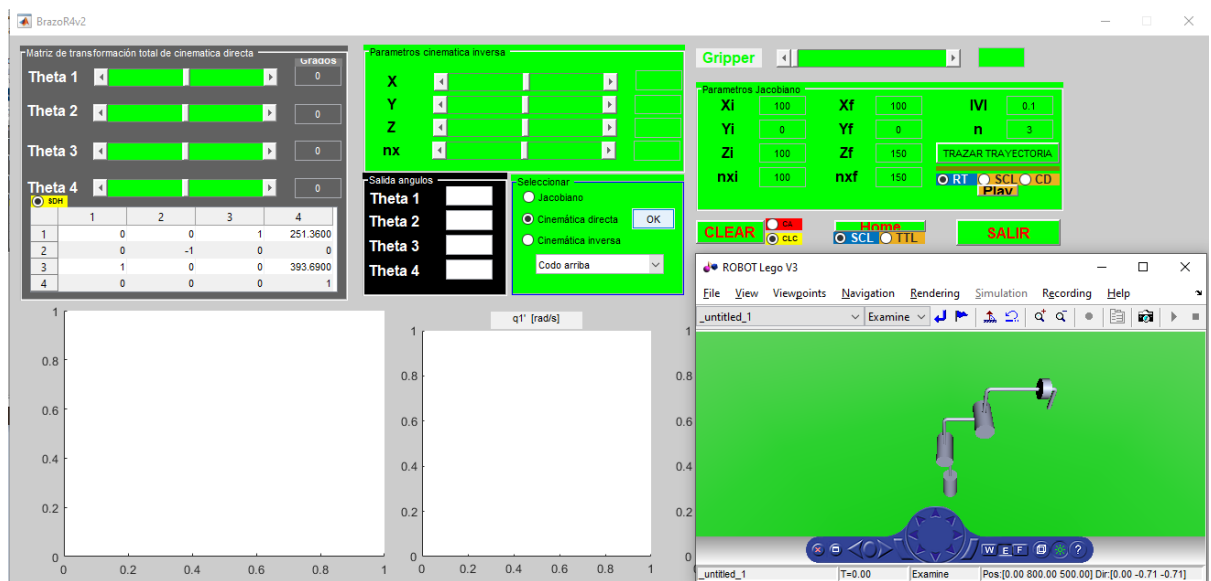


Figura 42. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Fuente:(Propia)

4.1. Análisis cinemático.

La configuración realizada en el diseño mecánico del sistema permite determinar los parámetros de geometría necesarios para su configuración.

A continuación, se expone el análisis cinemático del dispositivo considerando el movimiento del prototipo sin tener en cuenta las fuerzas que lo ocasionan, estudiando los posicionamientos y determinando la velocidad en los ejes de articulación del sistema electromecánico.

4.1.1. Cinemática Directa.

En el siguiente desarrollo, la cinemática directa nos ayuda a expresar el movimiento del sistema de 4 grados de libertad de tal manera que, con los ángulos para las 3 articulaciones se pueda determinar la posición y ubicación del efector final.

Los expertos recomiendan que los brazos robóticos o también llamados manipuladores tengan un solo grado de libertad por cada articulación para poder aplicar la notación o convención de Denavit-Hartenberg, por esta razón, el presente proyecto contempla la metodología y es utilizada para el diseño del sistema electromecánico.

- **Parámetros de Denavit- Hartenberg.**

- D-H1. Numeración de los eslabones, iniciando con 1.
- D-H2. Numerar las articulaciones.

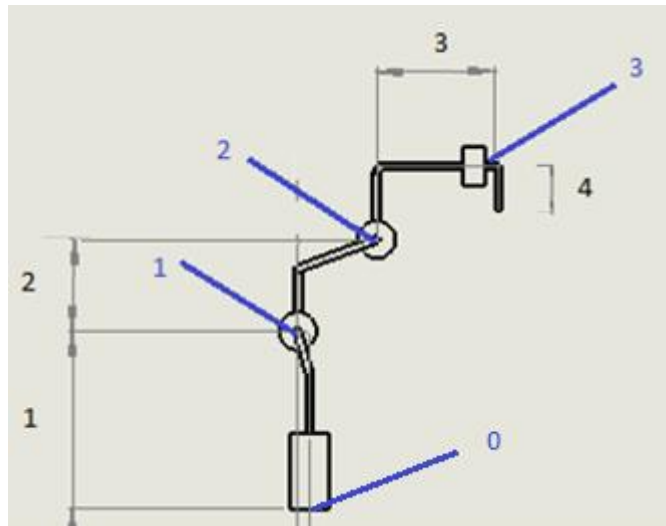


Figura 43. Numeración de eslabones y articulaciones.
DH1 en color negro, DH2 en color azul. Fuente:(Propia).

- D-H3. Localización del eje de cada articulación. De ser rotativa, el eje será entonces su propio eje de giro.

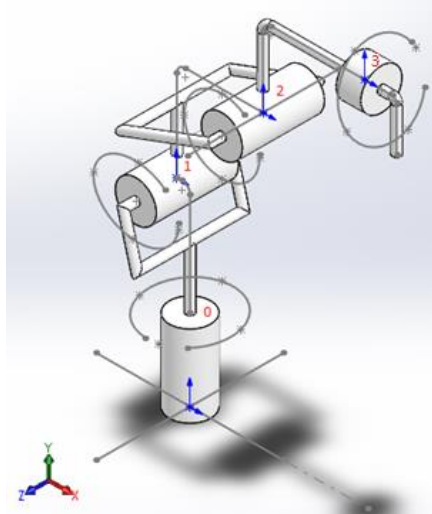


Figura 44. Eje de articulaciones. Fuente: (Propia).

- D-H4. Para i de 0 a $n-1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i+1$.
- D-H5. Ubicar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de manera que formen un procedimiento dextrógiro con z_0 .
- D-H6. Para i de 1 a $n-1$ situar el sistema $\{S_i\}$ en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- D-H7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- D-H8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
- D-H9. Situar el sistema $\{S_i\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

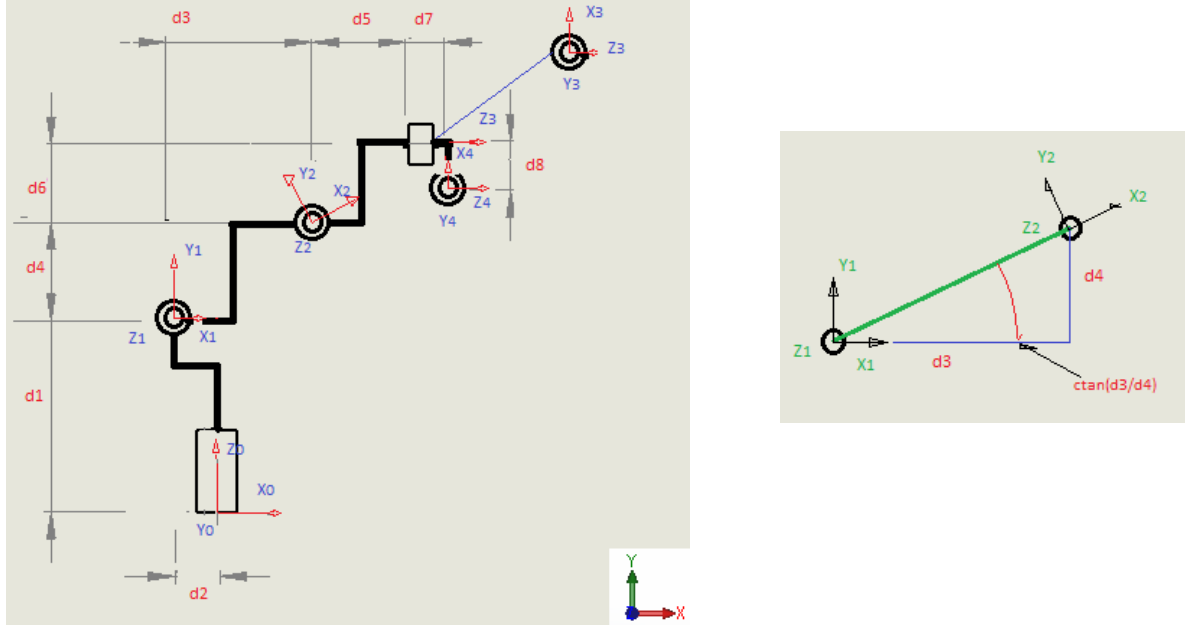


Figura 45. Geometría de parámetros de diseño. Fuente:(Propia).

- D-H10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
- D-H11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.
- D-H12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.
- D-H13. Obtener α_i como el ángulo que habría de girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.

De los parámetros D-H10, D-H11, D-H12 y D-H13 se obtiene la tabla a continuación:

Eslabón	θ	d	a	α
1	θ_1 λ_1	d_1	$-d_2$	$\pi/2$
2	θ_2 $\alpha \tan\left(\frac{d_4}{d_3}\right) + \lambda_2$	0	$d_3 / \sin(\alpha \tan d_3/d_4)$	0
3	θ_3 $\frac{\pi}{2} - \tan\left(\frac{d_4}{d_3}\right) - \lambda_3$	0	d_6	$\pi/2$
4	θ_3 λ_4	$d_5 - d_7$	$-d_8$	0

Tabla 1. Definición de Parámetros D-H. Fuente (Propia).

En el cual, θ_i , d_i , a_i , α_i son los parámetros D-H del eslabón i . Así, es posible determinar los parámetros θ_i , d_i , a_i , α_i para la obtención de las matrices ${}^{i-1}A_i$ y la relación de cada uno los eslabones del sistema robótico.

1. Rotación en torno al eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
 2. Traslación longitudinal de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $d_i (0,0,d_i)$.
 3. Traslación longitudinal de x_i una distancia a_i ; vector $a_i (a_i,0,0)$.
 4. Rotación en torno al eje x_i un ángulo α_i .
- D-H14. Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$, se ingresan los datos obtenidos en D-H10, D-H11, D-H12 y D-H13.

- D-H15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2.. {}^{n-1}A_n$.

Para el análisis de las matrices se tiene en cuenta el referente matemático de la metodología y se asignan los valores obtenidos en el programa Matlab:

$A_{0-1} =$

$$\begin{pmatrix} c\lambda 1 & -s\lambda 1 & 0 & 0 \\ s\lambda 1 & c\lambda 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -L2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

En las líneas de código a continuación, se observan los parámetros definidos:

```

175 %% OA1
176 global ROTZ_thetal TRAZ_d1 TRAX_al ROTX_alpha a0_l thetal d1 al alpha lambdal
177 syms ROTZ_theta TRAZ_d TRAX_a ROTX_alpha a0_l thetal d1 al alpha %lambdal
178
179 %lambdal = pi/3; %se estan modificando ahora con el slider
180 thetal=0 + lambdal;
181 d1=l1;
182 al=-l2;
183 alpha=pi/2;
184
185 ROTZ_thetal=[cos(thetal) -sin(thetal) 0 0; sin(thetal) cos(thetal) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
186 TRAZ_d1=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d1; 0 0 0 1];
187 TRAX_al=[1 0 0 al; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
188 ROTX_alpha=[1 0 0 0; 0 cos(alpha) -sin(alpha) 0; 0 sin(alpha) cos(alpha) 0; 0 0 0 1];

```

Figura 46. Código Matlab matriz de transformación A=0-1. Fuente:(Propia)

Este ejercicio de análisis se repite en el análisis de todas las articulaciones del dispositivo.

$$A_{1-2} = \begin{pmatrix} c(\lambda_2 + a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & -s(\lambda_2 + a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & 0 & 0 \\ s(\lambda_2 + a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & c(\lambda_2 + a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$* \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & (\sqrt{L_4(L_3^2/L_4^2 + 1)}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

```

205 %% 1A2
206 - global ROTZ_theta2 TRAZ_d2 TRAX_a2 ROTX_alpha2 a1_2 theta2 d2 a2 alpha2 a0_2 lambda2
207 - syms ROTZ_theta2 TRAZ_d2 TRAX_a2 ROTX_alpha2 a1_2 theta2 d2 a2 alpha2 a0_2 %lambda2
208
209 % theta2=-atan(14/13);
210 % theta2*180/pi
211 % d2=0;
212 % a2=-(13)/sin(atan(13/14))
213 % alpha2=0;
214
215 %lambda2 = pi/3; %se estan modificando ahora con el slider
216 - theta2=atan(14/13) + lambda2;% 8.5308 grados + lo que le diga que se mueva que es el mismo landa
217 %theta2*180/pi
218 - d2=0;
219 - a2=(13)/sin(atan(13/14));
220 - alpha2=0;
221
222 - ROTZ_theta2=[cos(theta2) -sin(theta2) 0 0; sin(theta2) cos(theta2) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
223 - TRAZ_d2=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d2; 0 0 0 1];
224 - TRAX_a2=[1 0 0 a2; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
225 - ROTX_alpha2=[1 0 0 0; 0 cos(alpha2) -sin(alpha2) 0; 0 sin(alpha2) cos(alpha2) 0; 0 0 0 1];

```

Figura 47. Código Matlab matriz de transformación A=1-2. Fuente: (Propia).

$$A_{2-3} = \begin{pmatrix} c(\lambda_3 - \frac{\pi}{2} + \tan(\frac{L_4}{L_3})) & -s(\lambda_3 - \frac{\pi}{2} + \tan(\frac{L_4}{L_3})) & 0 & 0 \\ -s(\lambda_3 - \frac{\pi}{2} + a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & c(\lambda_3 - \frac{\pi}{2} a \tan(\frac{L_4}{L_3})) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} *$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

```

240 %% 2A3
241 global ROTZ_theta3 TRAZ_d3 TRAX_a3 ROTX_alpha3 a2_3 theta3 d3 a3 alpha3 a0_3 lambda3
242 syms ROTZ_theta3 TRAZ_d3 TRAX_a3 ROTX_alpha3 a2_3 theta3 d3 a3 alpha3 a0_3 %lambda3
243
244 %lambda3 = pi/6; %se estan modificando ahora con el slider
245 theta3=pi/2 - atan(14/13) - (lambda3);%% el signo "-" toca ponerlo que es cuando le sumo en solid
246 %theta3*180/pi
247 d3=0;
248 a3=16;
249 alpha3=pi/2;
250
251 ROTZ_theta3=[cos(theta3) -sin(theta3) 0 0; sin(theta3) cos(theta3) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
252 TRAZ_d3=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d3; 0 0 0 1];
253 TRAX_a3=[1 0 0 a3; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
254 ROTX_alpha3=[1 0 0 0; 0 cos(alpha3) -sin(alpha3) 0; 0 sin(alpha3) cos(alpha3) 0; 0 0 0 1];
...

```

Figura 48. Código Matlab matriz de transformación A=2-3. Fuente:(Propia)

$$A_{3-4} = \begin{pmatrix} c\lambda 4 & -s\lambda 4 & 0 & 0 \\ s\lambda 4 & c\lambda 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 + L_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -L_8 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Ecuación 1- Solución Matrices. Cinemática Directa, Fuente (Propia).

```

260 %% 3A4
261 global ROTZ_theta4 TRAZ_d4 TRAX_a4 ROTX_alpha4 a3_4 theta4 d4 a4 alpha4 a0_4 lambda4
262 syms ROTZ_theta4 TRAZ_d4 TRAX_a4 ROTX_alpha4 a3_4 theta4 d4 a4 alpha4 a0_4 %lambda4
263
264 %lambda4 = pi/2; %se estan modificando ahora con el slider
265 theta4=0 +lambda4;
266 %theta4*180/pi
267 d4=15+17;
268 a4=-18;
269 alpha4=0;
270
271 ROTZ_theta4=[cos(theta4) -sin(theta4) 0 0; sin(theta4) cos(theta4) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
272 TRAZ_d4=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d4; 0 0 0 1];
273 TRAX_a4=[1 0 0 a4; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
274 ROTX_alpha4=[1 0 0 0; 0 cos(alpha4) -sin(alpha4) 0; 0 sin(alpha4) cos(alpha4) 0; 0 0 0 1];
...

```

Figura 49. Código Matlab matriz de transformación A=3-4. Fuente: (Propia)

- La matriz **T** define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

Los valores obtenidos se asignan al programa, con el fin de parametrizar sus resultados de acuerdo con las condiciones geométricas del sistema electromecánico.

```

299 function MatrizDenhavitHartenberg(handles)
300 - global lambda1 lambda2 lambda3 lambda4
301 - global a0_4
302 % matriz denhavit-hartenberg
303 % ART THETA d a ALPHA
304 - datos=round([a0_4(:,1) a0_4(:,2) a0_4(:,3) a0_4(:,4)],3);
305 - set(handles.uitable1,'Data',datos(:,,:));

```

Figura 50. Código Matlab Matriz de transformación definida. Fuente:(Propia).

La interfaz gráfica de usuario GUI permite la obtención de resultados paramétricos de la cinemática directa, correspondientes a la posición inicial (Posición Home) del sistema electromecánico:

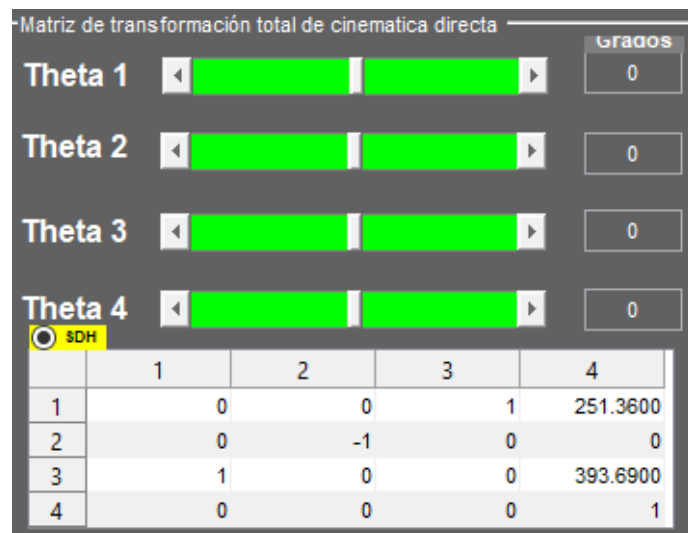


Figura 51. Matriz definida en interfaz gráfica de usuario. Fuente:(Propia).

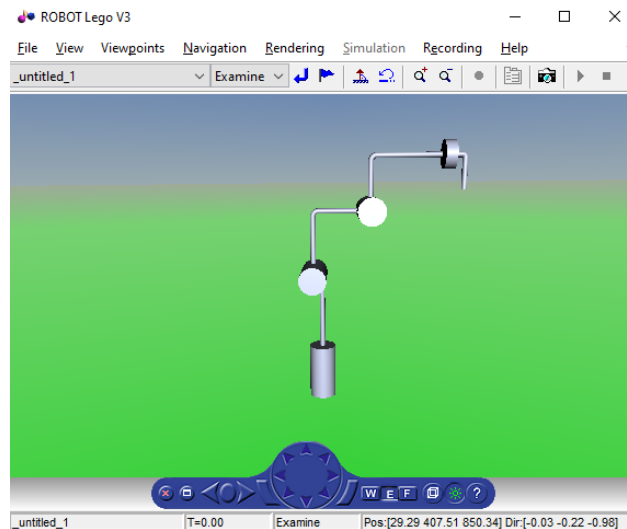


Figura 52. Posición Home. Fuente: (Propia)

4.1.2. Cinemática Inversa.

Por medio del proceso cinemático inverso, se hallan los parámetros que deben tener las coordenadas articulares del robot $q [q_1, q_2, \dots, q_n]$ con el fin de hacer que su extremo se posicione y oriente según una localización espacial determinada.

El estudio contempla el posicionamiento inicial determinado en el análisis por medio del Método Geométrico, descomponiendo la geometría espacial del sistema electromecánico en varios problemas de geometría plana.

Este método aplica para la morfología del sistema electromecánico objeto de estudio, puesto que cumple con la condición del ángulo inicial ($\alpha_i = 0$ o ± 90)

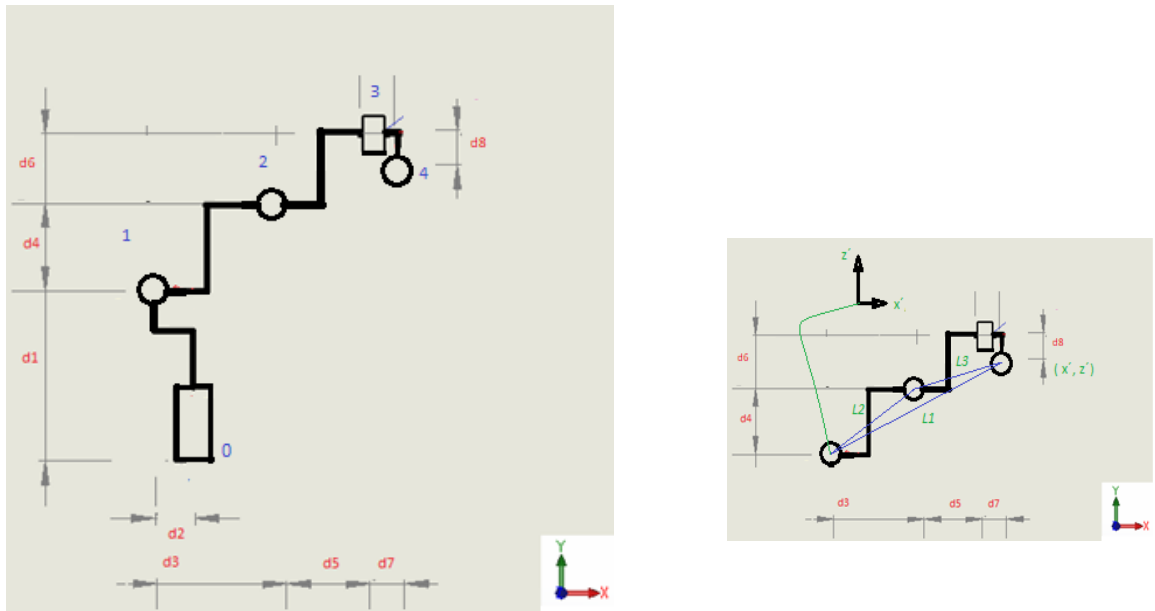


Figura 53. Método Geométrico para el Análisis cinemático inverso. Fuente: (Propia).

Para desplazamiento de sistemas coordenado.

$$z' = z - d1, \quad x = \sqrt{(x + d2 \cos(\theta1))^2 + (y + d2 \sin(\theta2))^2} \quad (4.5)$$

Las longitudes de triangulo escaleno, determinados por la ilustración 46, son:

$$l1 = \sqrt{z'^2 + x'^2},$$

$$l2 = \sqrt{d3^2 + d4^2},$$

$$l3 = \sqrt{(d6 - d8 * \cos(\theta4))^2 + (d5 + d7)^2} \quad (4.6)$$

Los ángulos representados en el triángulo para codo arriba/abajo son:

$$\alpha^1 = \tan^{-1} \left(\frac{z'}{x'} \right) \quad (4.7)$$

Para α_2 se utiliza la ley del coseno:

$$L_3^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2(l_1 * l_2) \cos \alpha_2 \quad (4.8)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{2 (l_1 * l_2)} \right) \quad (4.9)$$

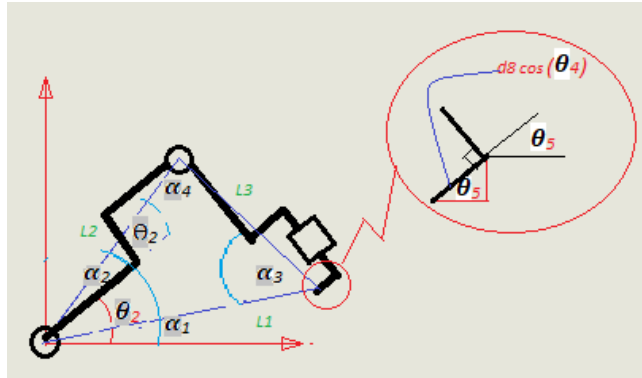


Figura 54. Ángulos de representación. Fuente:(Propia).

$\alpha_3 =$ se desarrolla la ley del seno

$$\frac{\sin(\alpha_3)}{l_2} = \frac{\sin(\alpha_2)}{l_3} \rightarrow \alpha_3 = \sin^{-1} \left(\frac{l_2 * \sin(\alpha_2)}{l_3} \right) \quad (4.10)$$

Para $\alpha_4 =$ usamos igualdad de suma de los ángulos de triángulo escaleno.

$$\alpha_4 = \pi - \alpha_2 - \alpha_3 \quad (4.11)$$

El ángulo incremental para el θ_2 es:

$$\tan^{-1} \left(\frac{d^4}{d^3} \right) \quad (4.12)$$

El angulo incremental para el Θ_3 es:

$$\tan^{-1}\left(\frac{d_6-d_8 \cos(\theta_4)}{d_5 d_7}\right) \quad (4.13)$$

Codo arriba:

$$\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 - \tan^{-1}\left(\frac{d_4}{d_3}\right) \quad (4.14)$$

$$\theta_3 = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{d_4}{d_3}\right) - \alpha_4 + \tan^{-1}\left(\frac{d_6-d_8 \cos(\theta_4)}{d_5+d_7}\right) \quad (4.15)$$

Codo abajo:

$$\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 - \tan^{-1}\left(\frac{d_4}{d_3}\right) \quad (4.16)$$

$$\theta_3 = -(\pi + \tan^{-1}\left(\frac{d_4}{d_3}\right) - \alpha_4 - \tan^{-1}\left(\frac{d_6-d_8 \cos(\theta_4)}{d_5+d_7}\right)) \quad (4.17)$$

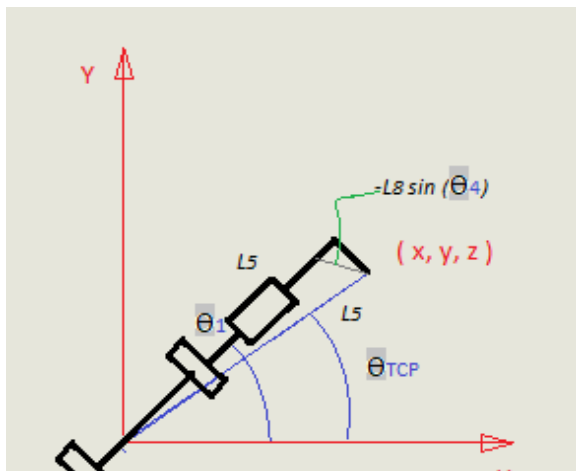


Figura 55. Sumatoria de ángulos de localización espacial. Fuente:(Propia).

$$\theta_{TCP} = \text{atan}\left(\frac{x}{y}\right)$$

l_4 está descrita por:

$$l_4 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.18)$$

Para θ_1 la suma de ángulos es:

$$\theta_1 = \theta_{TCP} + \sin^{-1}\left(\frac{-l_8 \text{sen}(\theta_4)}{l_4}\right) \quad (4.19)$$

La interfaz gráfica de usuario GUI, haciendo uso de los resultados obtenidos en el análisis matemático descrito, permite la determinación de los parámetros de resultados de la cinemática inversa, correspondientes a la posición inicial del sistema electromecánico.

Los resultados de las pruebas iniciales de posición se ven reflejado en la figura a continuación:

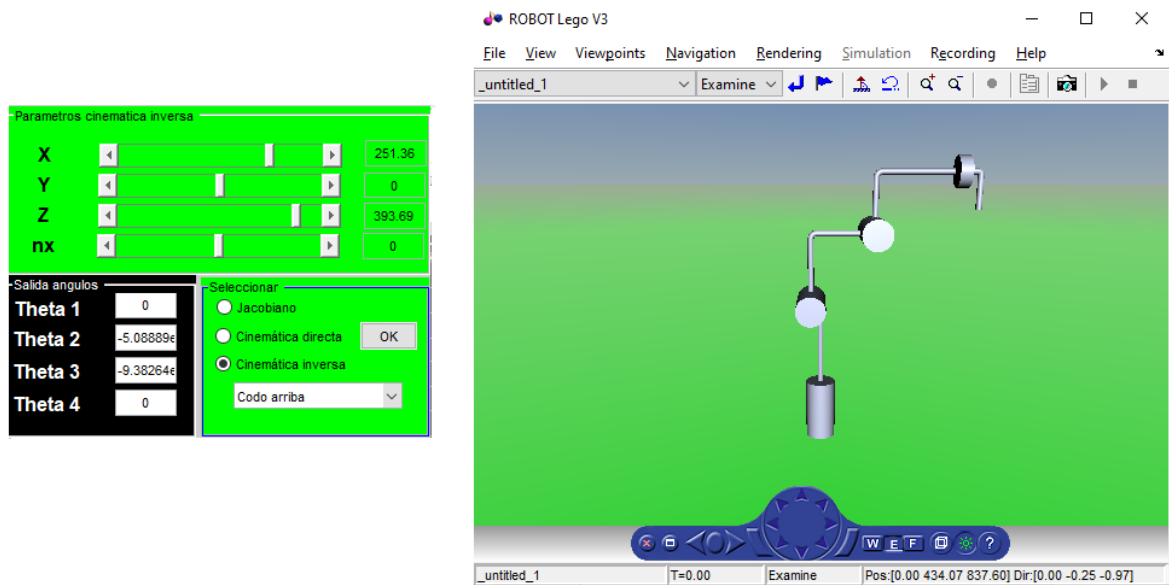


Figura 56. Análisis cinemática inversa posición 0. Fuente:(Propia).

Los valores obtenidos en los parámetros "Theta 2" y "Theta 3" tienden a 0, razón por la cual, se asignará dicho valor de 0 a los cálculos desarrollados.

4.1.3. Cinemática Diferencial.

Permite conocer y analizar la relación entre las velocidades de las articulaciones y las velocidades lineales y angulares del efector final angular del sistema electromecánico.

Para este proceso se aplican los conceptos referentes a los métodos analizados para la obtención de resultados.

Mediante la aplicación del método Jacobiano Geométrico inverso se obtiene:

- Para eslabones de rotación:

$$Ji = \left\{ \frac{{}^{\circ}Z_{I-1} \otimes {}^{i-1}Pn}{{}^{\circ}Z_{I-1}} \right\} \quad (4.20)$$

Donde \otimes es el producto cruz aplicando la operación binaria entre los dos vectores en el espacio tridimensional.

- Para eslabones de transferencia:

$$Ji = \left\{ \frac{{}^{\circ}Z_{I-1}}{0} \right\} \quad (4.21)$$

Se construyen las matrices correspondientes:

${}^{\circ}Z_0$ siempre parte desde el inicio:

$${}^{\circ}Z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$${}^{\circ}Z_1 = {}^{\circ}A_1(1; 3,3) \quad (4.23)$$

$${}^{\circ}Z2 = {}^{\circ}A2(1:3,3) \quad (4.24)$$

$${}^{\circ}P4 = {}^{\circ}A4(1:3,4) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$${}^1P4 = {}^{\circ}A4(1:3,4) - {}^{\circ}A1(1:3,4) \quad (4.26)$$

$${}^2P4 = {}^{\circ}A4(1:3,4) - {}^{\circ}A2(1:3,4) \quad (4.27)$$

No existe 3P4 dado que el inverso jacobiano (Jv) debe ser cuadrado, se aproxima el sistema como si el eje de la última articulación fuera paralelo y coincidente completamente al eje de rotación tres.

$J1$, $J2$ y $J3$ son las columnas constructoras del Jacobiano:

$$J1 = \begin{bmatrix} {}^{\circ}Z0 & \otimes & {}^{\circ}P4 \\ & {}^{\circ}Z0 & \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$J2 = \begin{bmatrix} {}^{\circ}Z1 & \otimes & {}^1P4 \\ & {}^{\circ}Z1 & \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$J3 = \begin{bmatrix} {}^{\circ}Z2 & \otimes & {}^2P4 \\ & {}^{\circ}Z2 & \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Jv (Jacobiana de velocidad lineal):

$$Jv = [{}^{\circ}Z0 \otimes {}^{\circ}P4 \quad {}^{\circ}Z1 \otimes {}^1P4 \quad {}^{\circ}Z2 \otimes {}^2P4] \quad (4.31)$$

$$\dot{q}l = \begin{pmatrix} \dot{q}^1 \\ \dot{q}^2 \\ \dot{q}^3 \end{pmatrix} = inv(jv) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.32)$$

$$vi = \frac{dx}{dt} \parallel \frac{dy}{dt} \parallel \frac{dz}{dt} \quad (4.33)$$

Una vez obtenidos los resultados teóricos de las matrices de transformación homogénea, se insertan en el código de Matlab para que el GUI permita realizar el análisis matemático y la relación entre las velocidades de las articulaciones, las velocidades lineales y angulares del efector final.

Para el ejemplo, se determinan los posicionamientos y trayectorias correspondientes al desplazamiento entre la posición Home y una posición 1 del sistema electromecánico, teniendo en cuenta la función a cumplir.

El ejercicio de ejemplo permite determinar, entre otros, parámetros de funcionamiento del aplicativo GUI de Matlab, medidas de posicionamiento y correlación de resultados constructivos:

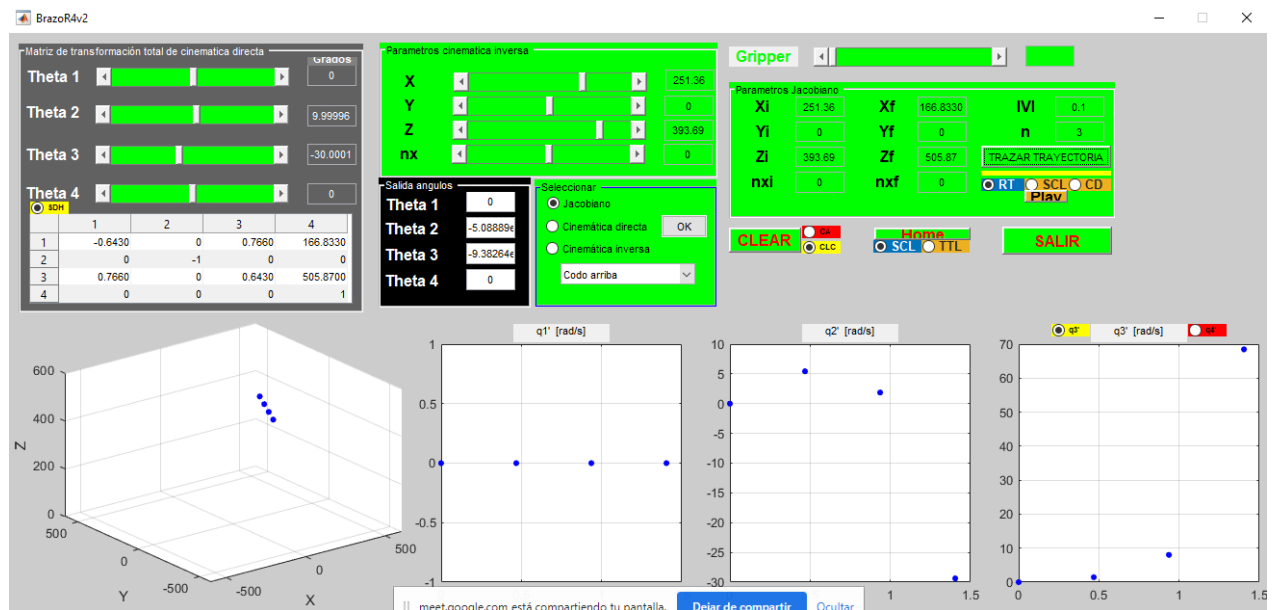


Figura 57. Análisis en interfaz gráfica de usuario. Fuente:(Propia).

El código de la interfaz gráfica de usuario nos permite generar el resultado matricial del modelo jacobiano:

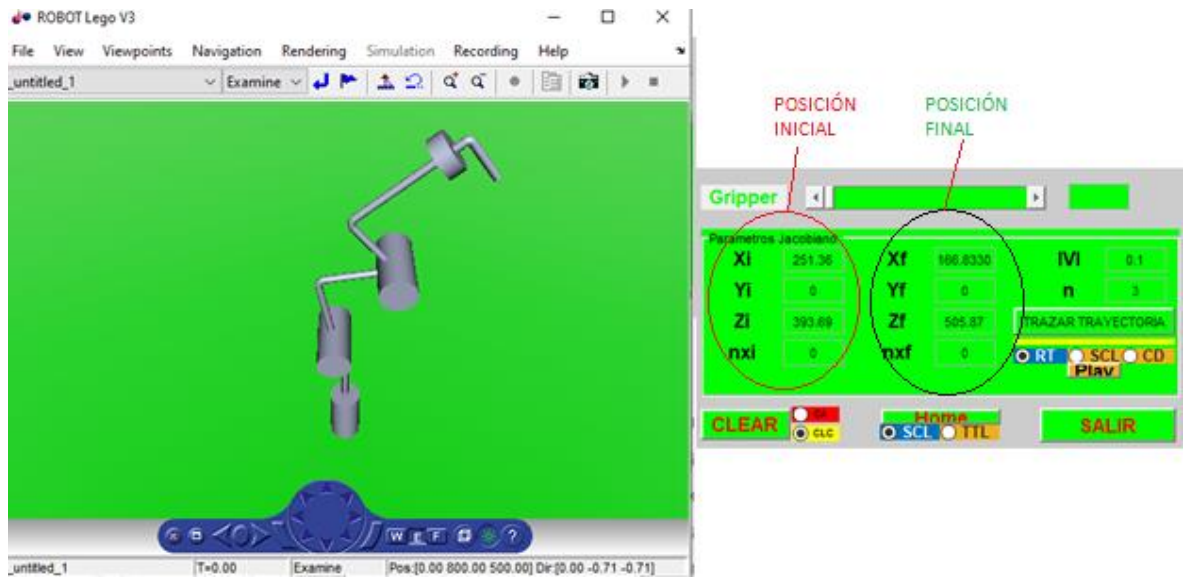


Figura 58. Análisis GUI Jacobiana Directa P0-P1. Fuente (Propia).

La ventana de comandos nos permite determinar la expresión de la velocidad del extremo del robot a partir del valor de las velocidades de cada una de las articulaciones, analizando n puntos lineales entre 2 posiciones, con velocidad lineal 0,1 m/s:

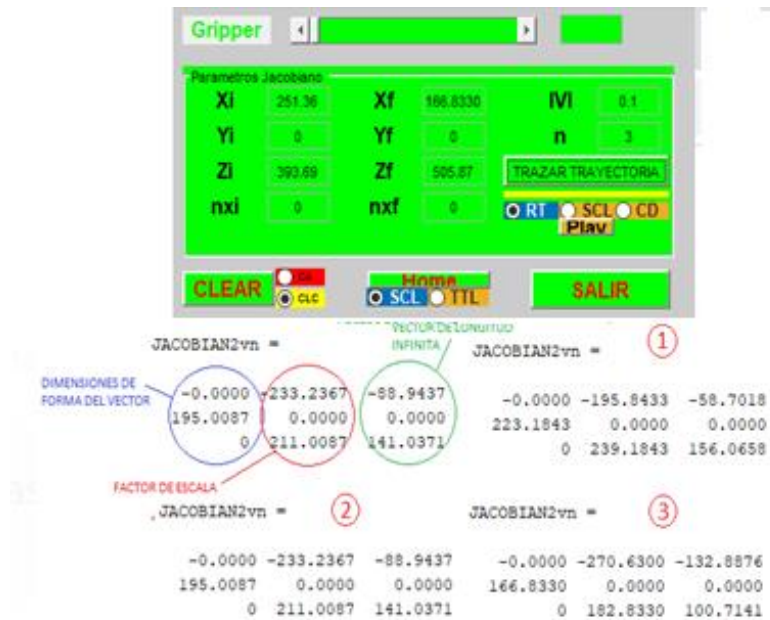


Figura 59. Análisis Matriz Jacobiana Directa. Fuente:(Propia).

①		①		②		③
ans =		ans =		ans =		ans =
0		0		0		0
ans =		ans =		ans =		ans =
0		5.4360		1.8710		-29.3730
ans =		ans =		ans =		ans =
0		1.4420		8.0160		68.4680

Figura 60. Velocidades angulares P0 - P1. Fuente: (Propia).

4.2. Análisis Cinético.

Por medio del análisis de la relación presente entre las fuerzas, las masas y el movimiento de los eslabones del sistema electromecánico, podemos determinar las fuerzas específicas que se requieren para producir los movimientos adecuados del prototipo.

En este capítulo, se exponen las hojas de cálculo correspondientes al análisis cinético de cada eslabón, teniendo en cuenta la información recopilada en el capítulo 3 del presente documento. El análisis mecánico del torque entregado por los motores y su sistema de transmisión en cada articulación del prototipo se compara con los resultados obtenidos por medio de la aplicación *LEGO GEAR CALCULATOR*, haciendo uso de las operaciones correspondientes en las tablas dinámicas realizadas en Excel.

El estudio se desarrolla desde la posición inicial del efector, teniendo en cuenta las cuantificaciones establecidas en el análisis cinemático para la posición Home del sistema electromecánico y las dimensiones tomadas desde los ensamblajes desarrollados en el software SolidWorks.

Este análisis se repite para todos los eslabones, teniendo en cuenta la secuencia de unión. A continuación, se describen los parámetros cinéticos analizados en las tablas dinámicas desarrolladas en Excel, con la siguiente estructura:

- **Eslabón 4 – Efecto final:**

- Construcción Pieza a Pieza: Representación gráfica, obtenida por medio del prototipo realizado en el programa SolidWorks, coincidente con el prototipo real.
- Construcción Simplificada: Representación gráfica desarrollada en el software de diseño SolidWorks y que corresponde al prototipo virtual simplificado para el análisis de parámetros, conservando los valores de masa y tamaño del prototipo real.

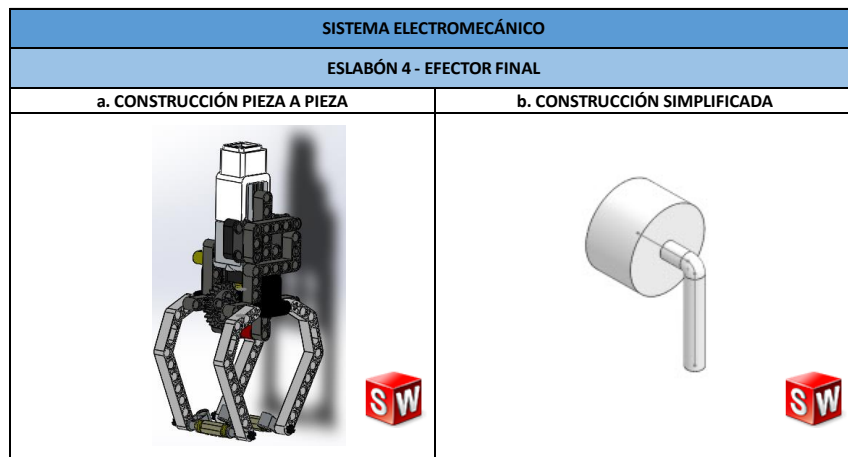


Figura 61. Representación Efecto final. Fuente: (Propia).

- Parámetros del fabricante: Datos técnicos tomados del manual de usuario del sistema MINDSTORMS LEGO Education EV3.
- Parámetros de diseño: En esta casilla se consignan los valores obtenidos teniendo en cuenta el tipo y cantidad de motores en relación con el torque entregado por el sistema de transmisión mecánica.

- e. Requerimientos de diseño: Se establecen los parámetros mínimos de funcionamiento del sistema electromecánico para cada articulación, teniendo en cuenta el valor de carga a trasladar, la sumatoria de peso de los eslabones subsecuentes en relación con la distancia perpendicular al punto de aplicación de la fuerza:

$$\tau = (m * g) * d \quad (4.33)$$

- f. Obtención por aplicación: Haciendo uso de la aplicación *LEGO GEAR CALCULATOR* se obtiene la relación de transmisión del sistema mecánico para cada articulación, de igual manera, el programa entrega los datos de torque final y reducción de velocidad, según su configuración:


PARÁMETROS SELECCIÓN ACTUADORES			
EFECTOR FINAL			
c. PARÁMETROS DEL FABRICANTE		f. OBTENCIÓN POR APLICACIÓN	
ACTUADOR	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Motor Mediano:	1	M	Medium
Voltaje:	9	(V)	Voltio
Velocidad:	240 - 250	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque de rotación:	0,08	(N.m)	Newton*metro
Torque de arranque:	0,15	(N.m)	Newton*metro
d. PARÁMETROS DE DISEÑO			
Relación de transmisión:	24	a	1
Velocidad:	10,833	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque entregado :	3,6	(N.m)	Newton*metro
e. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
Distancia a la carga:	0,07	(m)	metro
Masa a trabajar:	0,072	(Kg)	Kilogramo
Aceleración de la gravedad:	9,81	(m/s^2)	metro/seg^2
Torque requerido:	0,049442	(N.m)	Newton*metro
 <small>Motor mediano</small>			

Tabla 2. Parámetros de diseño Efector Final. Fuente: (Propia).

- **Eslabón 3:**

Este eslabón en particular es el único del sistema electromecánico para el cual se determina el uso del conjunto engranaje planetario, permitiendo controlar los parámetros requeridos para este punto:

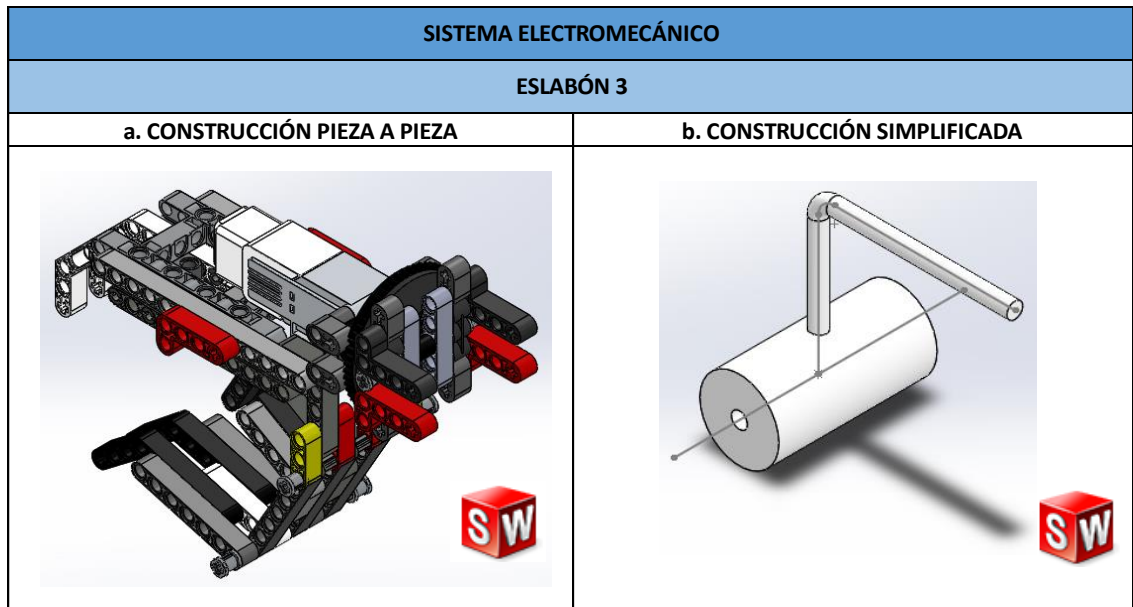



Figura 62. Representación Eslabón 3. Fuente: (Propia).

Para el análisis de la articulación 3 se tiene en cuenta el valor de la masa del efector sumado a la del objeto a trasladar, con el fin de determinar los valores máximos de momento requeridos en la articulación.

Los resultados se consolidan en la tabla a continuación, teniendo en cuenta los referentes del eslabón anterior:

PARÁMETROS SELECCIÓN ACTUADORES			
ESLABÓN 3			
c. PARÁMETROS DEL FABRICANTE		f. OBTENCIÓN POR APLICACIÓN	
ACTUADOR	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Motor Mediano:	1	M	Medium
Voltaje:	9	(V)	Voltio
Velocidad:	240 - 250	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque de rotación:	0,08	(N.m)	Newton*metro
Torque de arranque:	0,15	(N.m)	Newton*metro
d. PARÁMETROS DE DISEÑO			
Relación de transmisión:	3	a	1
Velocidad:	86,666	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque entregado :	0,45	(N.m)	Newton*metro
e. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
Distancia a la carga:	0,06	(m)	metro
Masa a trabajar:	0,1795	(Kg)	Kilogramo
Aceleración de la gravedad:	9,81	(m/s^2)	metro/seg^2
Torque requerido:	0,105654	(N.m)	Newton*metro
			

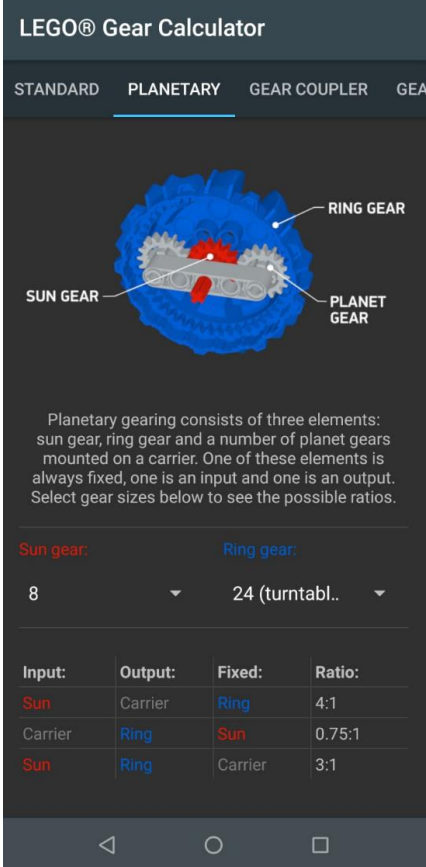


Tabla 3. Parámetros de diseño Eslabón 3. Fuente: (Propia).

- **Eslabón 2:**

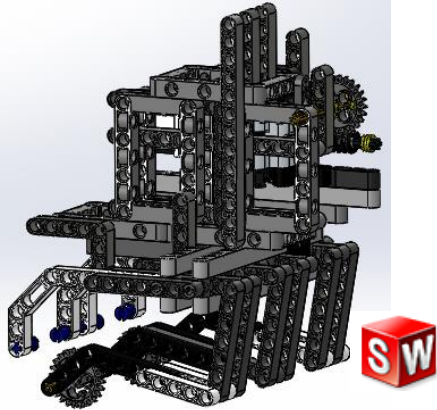
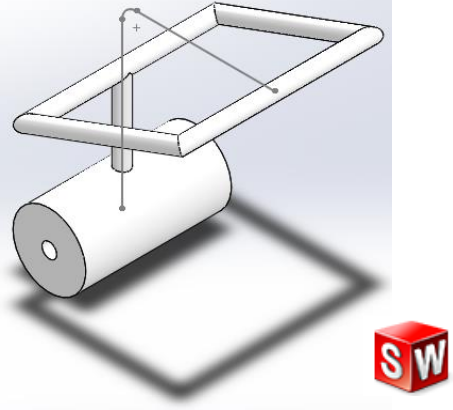

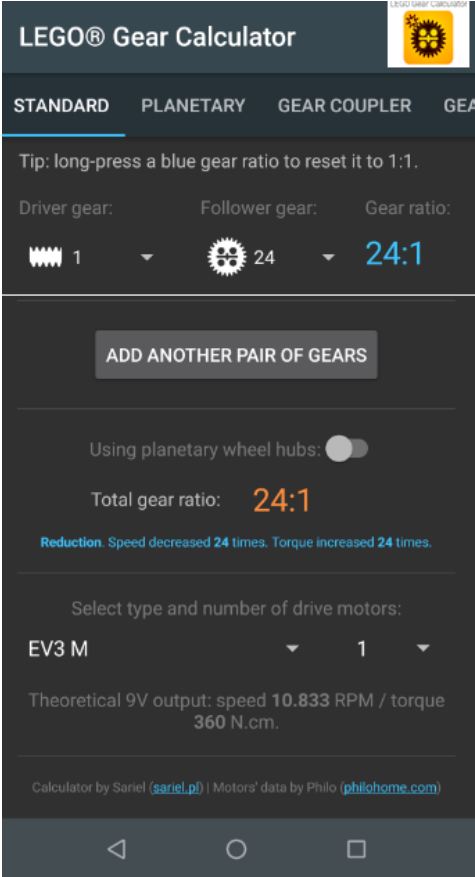
SISTEMA ELECTROMECAÁNICO	
ESLABÓN 2	
a. CONSTRUCCIÓN PIEZA A PIEZA	b. CONSTRUCCIÓN SIMPLIFICADA
	

Figura 63. Representación Eslabón 2. Fuente: (Propia).

En el análisis de la articulación 2 se tiene en cuenta la distribución de masas hasta el punto del efector final, realizando la sumatoria de peso del eslabón 3 y el sistema de efector final (eslabón 4), de igual manera la distancia perpendicular a la aplicación de la fuerza.

Teniendo en cuenta los referentes del anterior, los resultados se consignan en la tabla a continuación:

PARÁMETROS SELECCIÓN ACTUADORES			
ESLABÓN 2			
c. PARÁMETROS DEL FABRICANTE			f. OBTENCIÓN POR APLICACIÓN
ACTUADOR	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Motor Mediano:	1	M	Medium
Voltaje:	9	(V)	Voltio
Velocidad:	240 - 250	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque de rotación:	0,08	(N.m)	Newton*metro
Torque de arranque:	0,15	(N.m)	Newton*metro
d. PARÁMETROS DE DISEÑO			
Relación de transmisión:	24	a	1
Velocidad:	10,833	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque entregado :	3,6	(N.m)	Newton*metro
e. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
Distancia a la carga:	0,157	(m)	metro
Masa a trabajar:	0,3297	(Kg)	Kilogramo
Aceleración de la gravedad:	9,81	(m/s^2)	metro/seg^2
Torque requerido:	0,507794	(N.m)	Newton*metro
 <small>Motor mediano</small>			



The screenshot shows the LEGO Gear Calculator interface. It displays a driver gear of 1 and a follower gear of 24, resulting in a gear ratio of 24:1. The total gear ratio is also shown as 24:1. The app includes options for planetary wheel hubs and a selection of drive motors, currently set to EV3 M. Theoretical 9V output is shown as 10.833 RPM and 360 N.cm.

Tabla 4. Parámetros de diseño Eslabón 2. Fuente: (Propia).

- **Eslabón 1 – Parte 2 -3:**

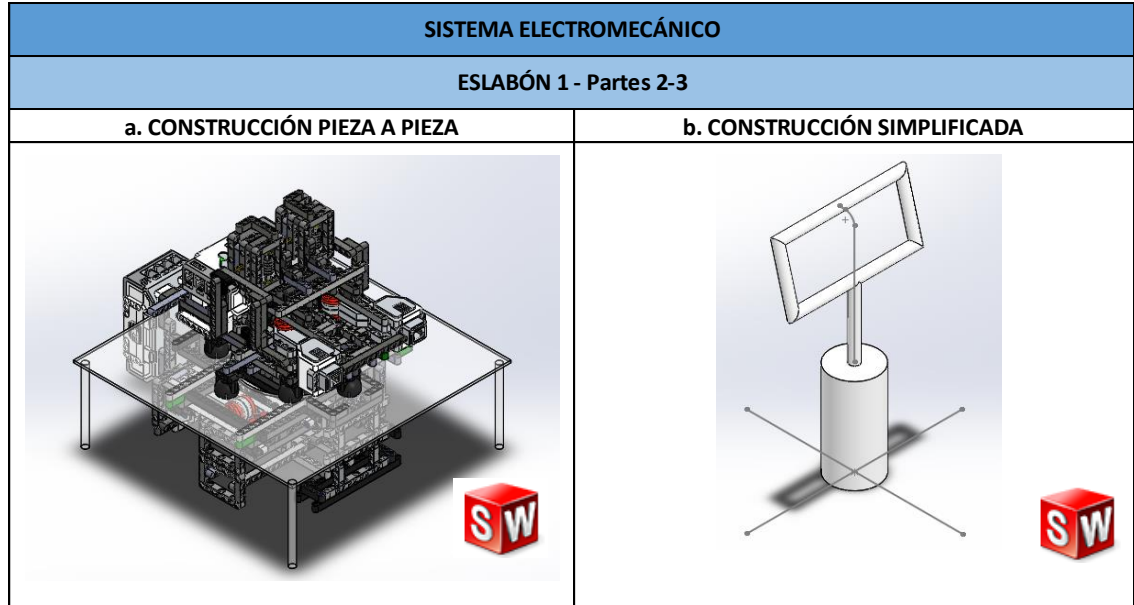

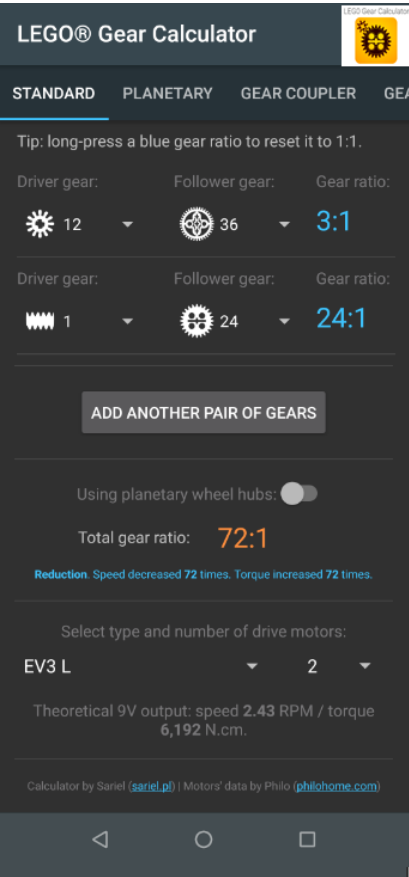


Figura 64. Representación Eslabón 1, Parte 2-3. Fuente: (Propia).

El estudio de los parámetros cinéticos de la articulación 1 contempla las características geométricas de la distancia al efector final y el parámetro de peso total de los eslabones subsecuentes (2, 3 y 4).

Los parámetros obtenidos se consignan en la tabla a continuación:

PARÁMETROS SELECCIÓN ACTUADORES			
ESLABÓN 1 - Partes 2-3			
c. PARÁMETROS DEL FABRICANTE		f. OBTENCIÓN POR APLICACIÓN	
ACTUADOR	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Motor Grande:	2	L	Large
Voltaje:	9	(V)	Voltio
Velocidad:	160 - 170	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque de rotación:	0,2	(N.m)	Newton*metro
Torque de arranque:	0,43	(N.m)	Newton*metro
d. PARÁMETROS DE DISEÑO			
Relación de transmisión:	72	a	1
Velocidad:	2,43	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque entregado :	61,92	(N.m)	Newton*metro
e. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
Distancia a la carga:	0,26236	(m)	metro
Masa a trabajar:	0,6124	(Kg)	Kilogramo
Aceleración de la gravedad:	9,81	(m/s^2)	metro/seg^2
Torque requerido:	1,576165	(N.m)	Newton*metro
			



The screenshot shows the LEGO Gear Calculator app interface. It displays two gear sets: a 12-tooth driver gear and a 36-tooth follower gear with a 3:1 ratio, and a 1-totooth driver gear and a 24-tooth follower gear with a 24:1 ratio. The total gear ratio is calculated as 72:1. The app also shows options for planetary wheel hubs and motor selection (EV3 L, 2).

Tabla 5. Parámetros de diseño Eslabón 1, Parte 2-3. Fuente: (Propia).

- **Eslabón 1 – Parte 1:**

En la articulación 0 se encuentra el subsistema denominado eslabón 1 parte 1 el cual se encarga de dar rotación al prototipo.

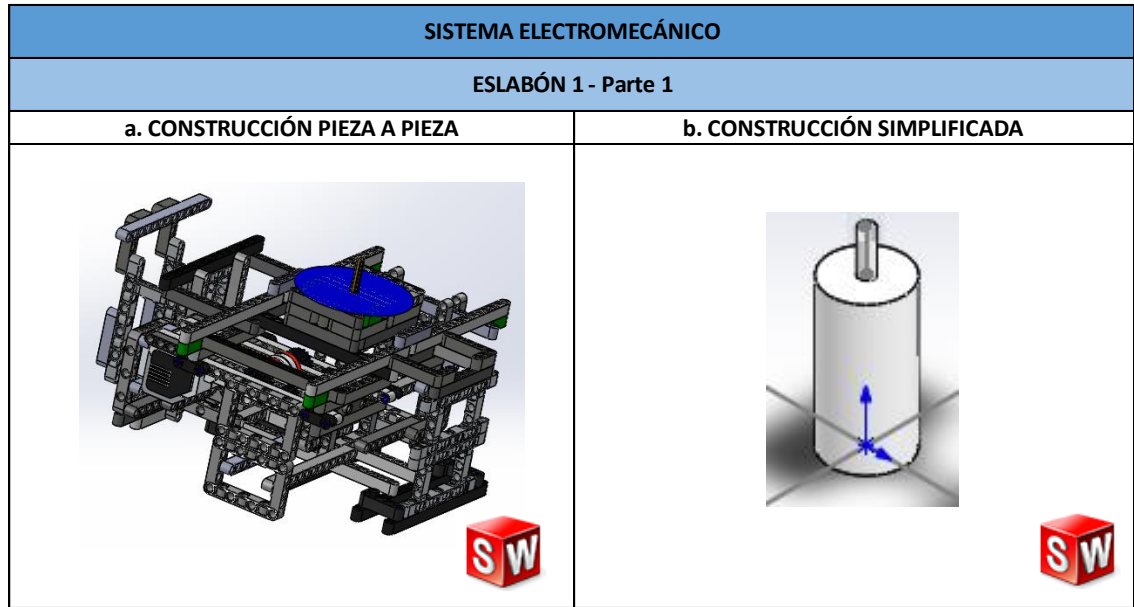



Figura 65. Representación Eslabón 1, Parte 1. Fuente: (Propia).

Para el cálculo de las especificaciones de diseño de motor, se tiene en cuenta la geometría respecto al punto de aplicación de fuerza, el peso obtenido en la sumatoria de los eslabones 2, 3 y 4, adicionados a los subsistemas del eslabón 1, partes 2 y 3.

Los resultados se consignan en la tabla a continuación, teniendo en cuenta las técnicas de análisis establecidas:

PARÁMETROS SELECCIÓN ACTUADORES			
ESLABÓN 1 - Parte 1			
c. PARÁMETROS DEL FABRICANTE			f. OBTENCIÓN POR APLICACIÓN
ACTUADOR	CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
Motor Grande:	1	L	Large
Voltaje:	9	(V)	Voltio
Velocidad:	160 - 170	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque de rotación:	0,2	(N.m)	Newton*metro
Torque de arranque:	0,43	(N.m)	Newton*metro
d. PARÁMETROS DE DISEÑO			
Relación de transmisión:	72	a	1
Velocidad:	2,43	(r.p.m)	Revoluciones por minuto
Torque entregado :	30,96	(N.m)	Newton*metro
e. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO			
Distancia a la carga:	0,25136	(m)	metro
Masa a trabajar:	1,506	(Kg)	Kilogramo
Aceleración de la gravedad:	9,81	(m/s^2)	metro/seg^2
Torque requerido:	3,713557	(N.m)	Newton*metro
			

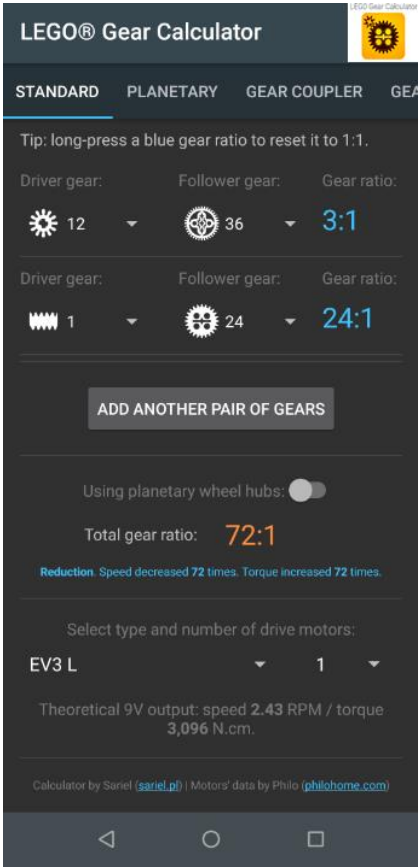


Tabla 6. Parámetros de diseño Eslabón 1, Parte 1. Fuente: (Propia).

La determinación de los requerimientos técnicos de torque en las articulaciones de transmisión permite definir parámetros de configuración de los actuadores a utilizar. Los datos obtenidos en el presente capítulo son utilizados para el análisis dinámico expuesto en el capítulo 6 del presente trabajo integral de grado.

CAPÍTULO 5. SISTEMA DE CONTROL.

El Software de programación *MINDSTORMS LEGO Education EV3*, basado en el desarrollo propuesto por la empresa *LabVIEW*, al ser de carácter iconográfico, permite desarrollar ejercicios de programación de forma concreta, ya que cada ícono de codificación contiene parámetros específicos de control, los cuales, facilitan la creación de rutinas de programación teniendo en cuenta las necesidades de cada proyecto.

Para aplicación de las rutinas de programación se tiene en cuenta la caracterización del algoritmo de programación de la siguiente manera:

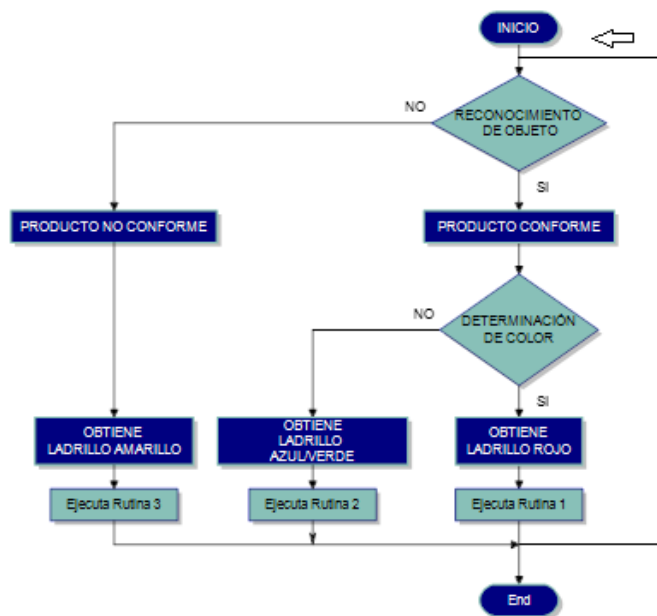


Figura 66. Algoritmo de programación. Fuente: (Propia).

A continuación, se describen de forma general las diferentes rutinas de programación y su objetivo dentro de los ejercicios de automatización y control del sistema.

Para el control de posicionamiento inicial y la ubicación frente a posibles interrupciones en la ejecución de rutinas o fallos en la alimentación del sistema, entre otros, se diseñaron programas de identificación de los actuadores controlados por tiempo de encendido y rotación del eje de control, teniendo en cuenta los subsistemas con transmisiones de potencia mecánica.

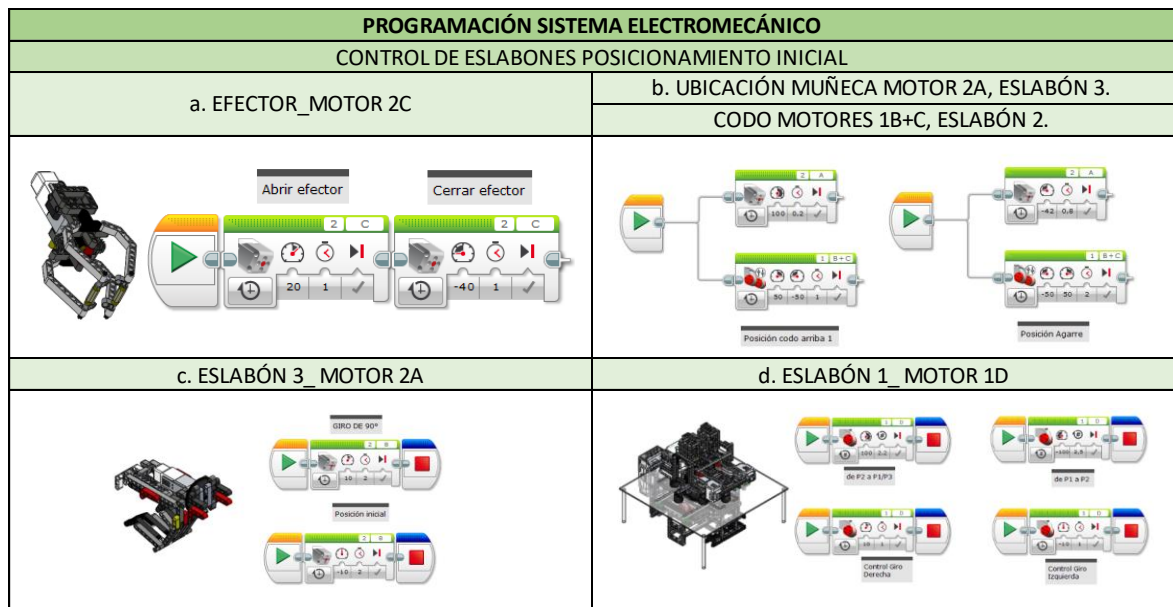


Figura 67. Control parametrizado de actuadores. Fuente: (Propia).

- a. Control individual de apertura y cierre del efector por medio del ajuste de potencia y dirección de rotación del motor conectado al ladrillo de programación 2-EV3, puerto de salida C.
- b. Control de la ubicación arriba y abajo de los eslabones 2 y 3 del sistema, los cuales permiten controlar la altura de posicionamiento del efector. El eslabón 2 está controlado por la potencia y dirección de rotación de los motores B+C, conectados a los puertos de salida del ladrillo de programación 1-EV3. El eslabón 1 se manipula por medio del motor 2A, conectado al bloque de programación 2-EV3.

- c. El eslabón 3 está controlado de manera independiente por el motor 2A, con el sistema de transmisión por engranaje planetario descrito previamente.
- d. El eslabón 1 permite la rotación de las articulaciones superiores, la traslación está determinada por el motor D acoplado al ladrillo de programación 1-EV3.

Las rutinas de proceso se diseñaron de manera individual, teniendo en cuenta la secuencia a seguir paso a paso por el dispositivo, definidas por el color de los objetos, para el traslado de estos a su ubicación final.

- Rutina de programación 1:

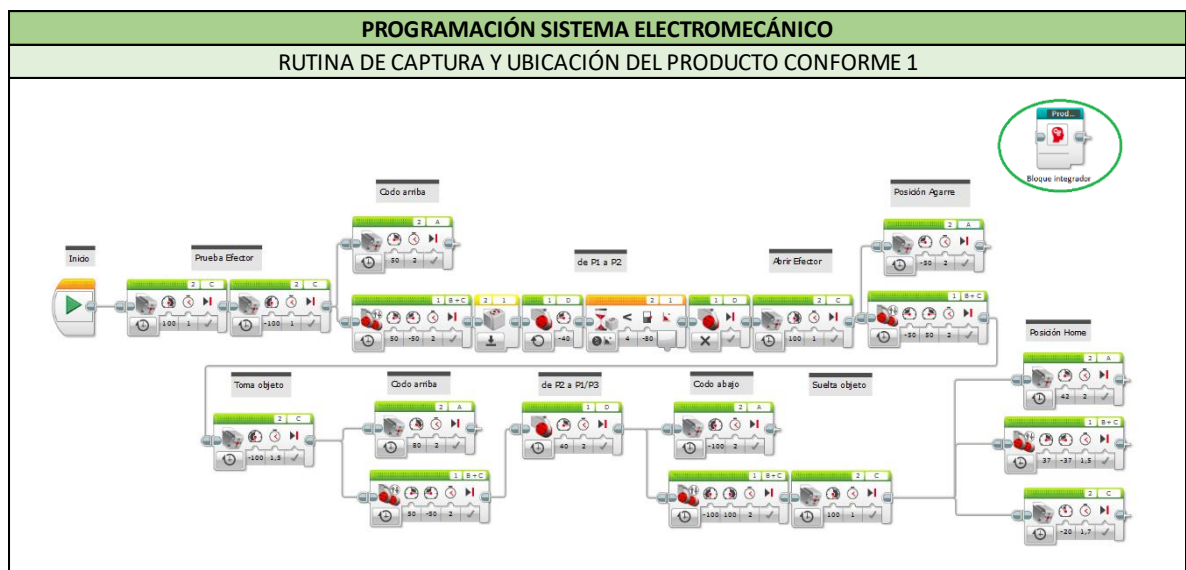


Figura 68. Rutina de selección y ubicación de productos a conformidad de producción 1. Fuente: (Propia).

El programa 1 permite trasladar los objetos cuyo color identifica los productos a conformidad (rojo) desde la posición de recepción hasta el punto de entrega.

Haciendo uso del sensor de giro, el brazo se ubica a 90° respecto al punto inicial, desarrollando este proceso en cada rutina de trabajo.

- Rutina de programación 2:

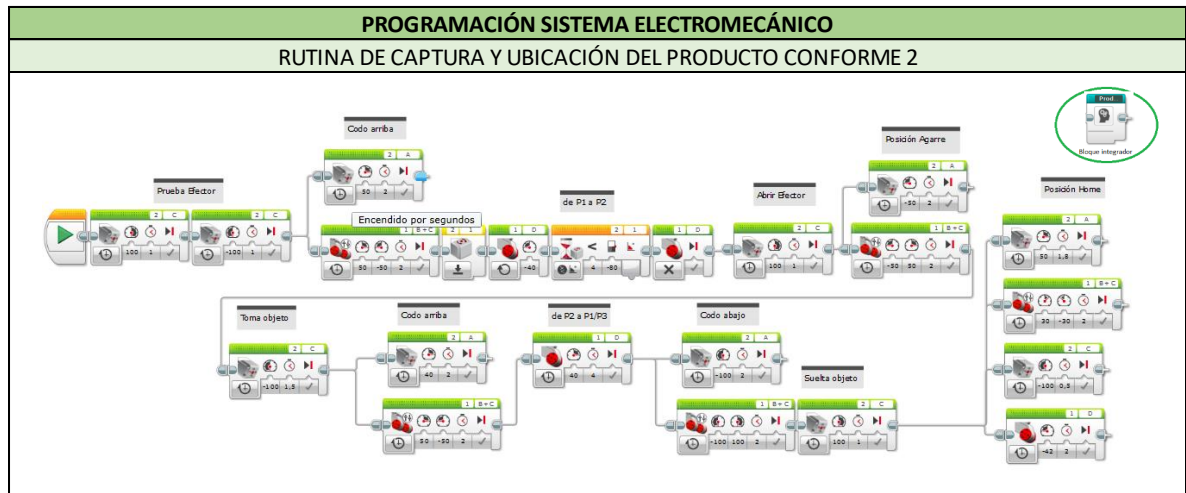


Figura 69. Rutina de selección y ubicación de productos a conformidad de producción 2. Fuente: (Propia).

La rutina 2 permite el traslado de los objetos cuyo color identifica los productos a conformidad 2 (azul) desde la posición de recepción hasta el punto de entrega.

Los algoritmos de programación se condensan por medio de la creación de bloques integradores, los cuales se utilizan en la rutina de programación general.

Para el desarrollo de la rutina de desplazamiento de productos No conformes se establece la tercera rutina mediante el código correspondiente.

- Rutina de programación 3:

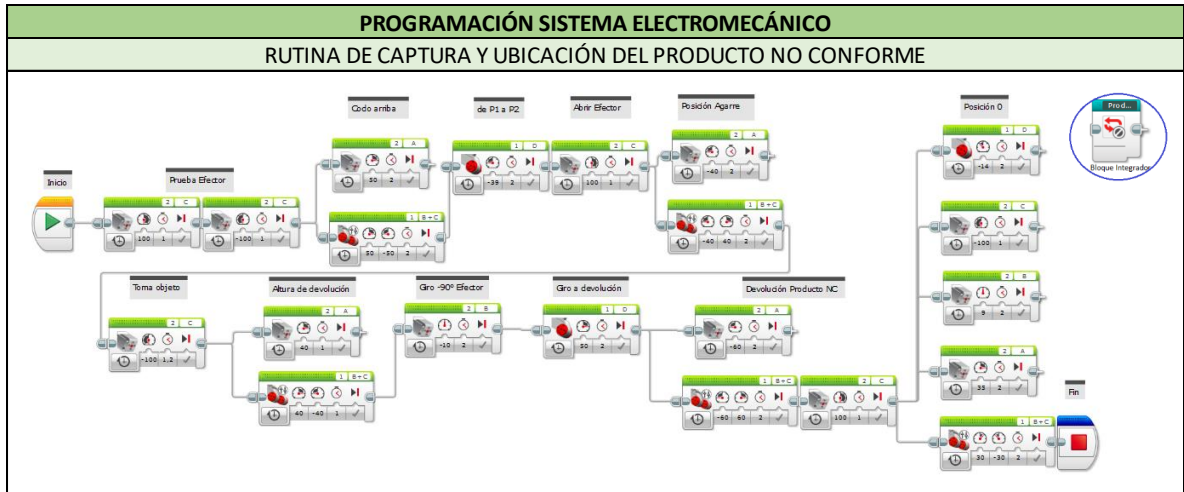


Figura 70. Rutina y ubicación de Productos No conformes. Fuente: (Propia).

El programa traslada los objetos cuyo color identifica los productos No Conformes (amarillo) desde la posición de recepción hasta el punto de devolución de producto. El programa se condensa por medio de la creación del bloque integrador para la rutina.

- Rutina de programación total:

Esta programación establece las condiciones de funcionamiento del sistema electromecánico, atendiendo el logaritmo de funcionamiento establecido.

La rutina de ejecución completa contiene los parámetros de control para un sistema de alimentación e identificación de los productos a clasificar, determina la posición del producto según la distancia de referencia por medio de la lectura del sensor ultrasónico y lo ubica para ser capturado por el efector del sistema electromecánico en posición 2.

El bloque interruptor registra el valor de lectura del parámetro de color y determina la subrutina a ejecutar.

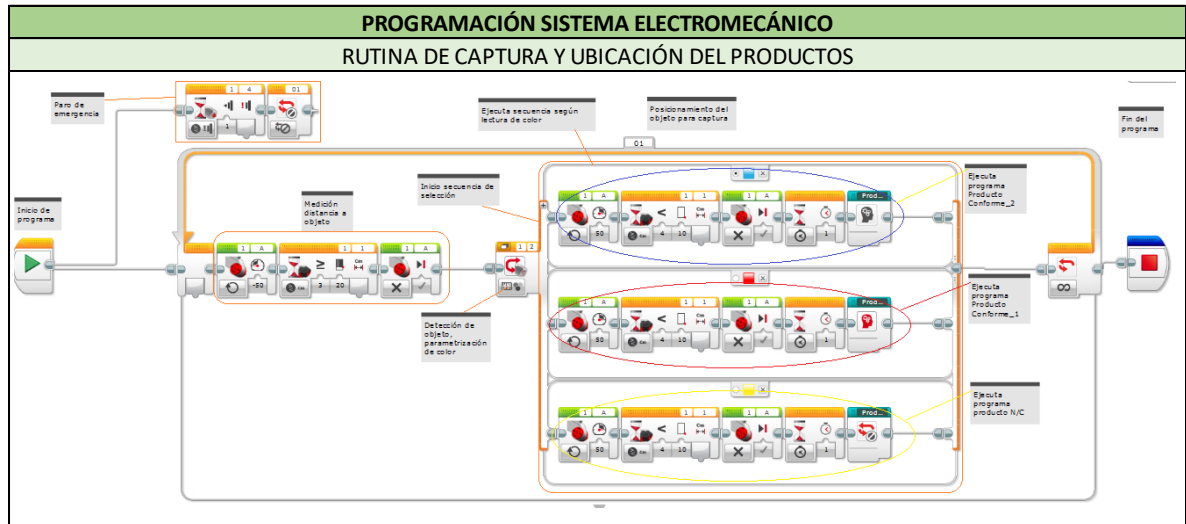


Figura 71. Rutina de ciclo total de Funcionamiento. Fuente: (Propia).

Al finalizar cada secuencia, el sistema electromecánico retorna a la posición "Home" (0) y se ubica para reiniciar el proceso.

El sistema de control posee un botón de paro de emergencia el cual, por medio de la configuración de la programación y haciendo uso de un sensor de tacto, detiene el dispositivo en el momento de su accionamiento.

Para la observación de las rutinas de programación, se anexa el video con la descripción de su funcionamiento.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El análisis de los parámetros de diseño permite el desarrollo del dispositivo electromecánico funcional, construido con herramientas LEGO Education compatibles con el ambiente de aprendizaje “Fábrica Didáctica” de la Universidad Antonio Nariño sede sur, cumpliendo con las características geométricas requeridas para la puesta a punto del sistema electromecánico organizador automático desmontable.

6.1. Resultados de Diseño

Teniendo en cuenta los requerimientos técnicos, variables y procesos de diseño electromecánico, se generan y exponen las hojas de cálculo, programación y operación requeridas para el prototipado del sistema electromecánico, teniendo en cuenta los conceptos de física, mecánica, electromecánica y robótica necesarios para su desarrollo.

Se realiza el análisis dinámico del dispositivo por medio de la aplicación de la extensión de robótica del software Matlab, generando la interfaz gráfica de usuario, teniendo en cuenta los análisis cinemáticos y cinéticos aplicados al sistema electromecánico y las características técnicas de los dispositivos utilizados, se obtienen resultados pertinentes y satisfactorios de funcionamiento.

6.2. Resultados constructivos

Se realiza diseño constructivo, teniendo en cuenta la información obtenida en el análisis dinámico del sistema electromecánico por medio de la aplicación de los criterios de ingeniería requeridos.

En el análisis constructivo final, derivado de las diversas pruebas y configuraciones constructivas se puede observar la configuración del sistema electromecánico integrado objeto de estudio.

La construcción prototípica virtual se desarrolla haciendo uso del programa SolidWorks, con el fin de emular la construcción prototípica real (ver anexo) y analizar sus características geométricas.

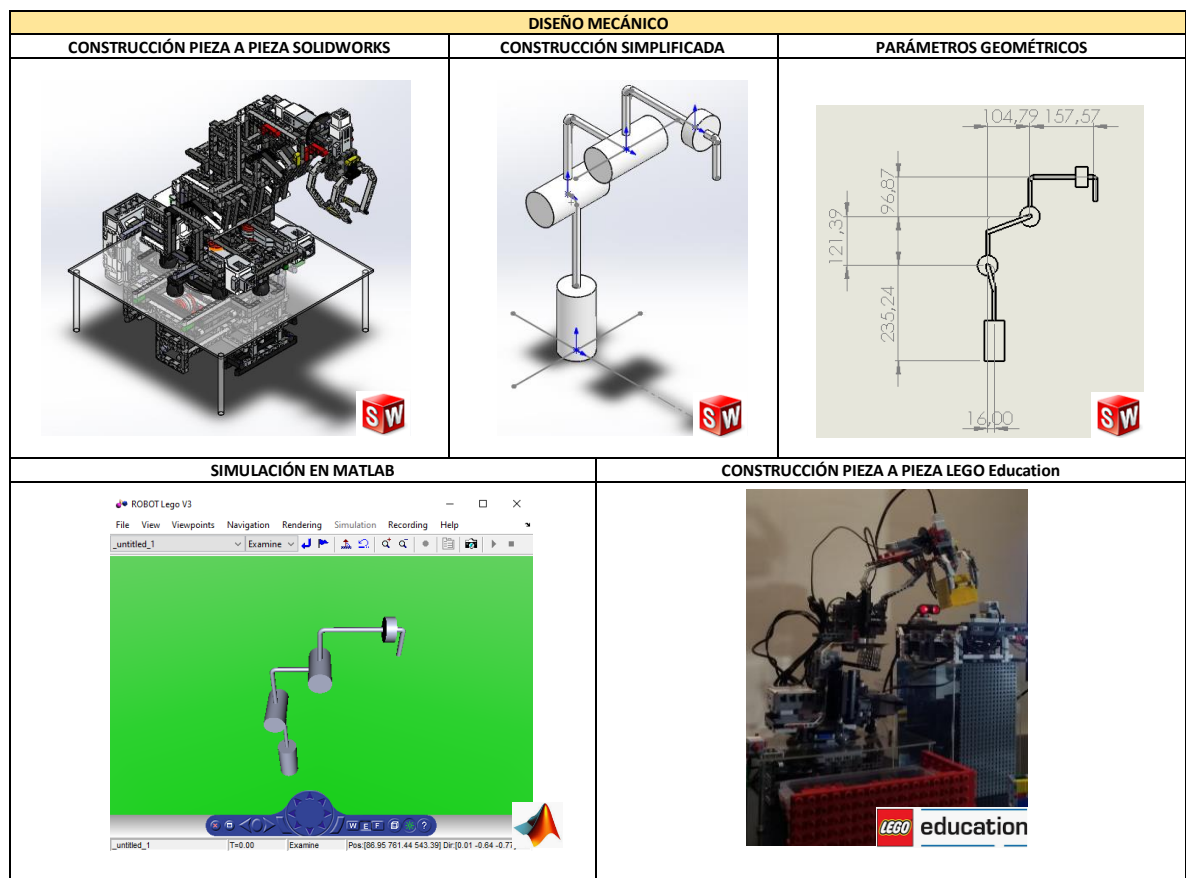


Figura 72. Diseño Sistema Electromecánico. Fuente: (Propia).

Se contempla la idea de hacer uso del prototipo virtual con el ánimo de desarrollar análisis adicionales de características físicas, como resistencia mecánica y estudio estático, no obstante, las condiciones de salubridad actuales impiden realizar este

estudio, al carecer de laboratorios especializados con equipos de cómputo con las especificaciones técnicas requeridas.

No obstante, por medio de la simplificación prototípica del sistema, haciendo uso del software de diseño mecánico SolidWorks, se obtienen y analizan los resultados geométricos requeridos para la implementación del dispositivo, así como el prototipo virtual utilizado en el GUI de Matlab para el análisis dinámico descrito en los resultados de diseño.

SISTEMA ELECTROMECAÁNICO								
PARÁMETROS CONSTRUCTIVOS					PARÁMETROS FÍSICOS			
ESLABÓN	# DE PIEZAS				ITEM	CARACTERIZACIÓN		
	LEGO Education	MATERIAL	ESPECIAL	MATERIAL		CANTIDAD	SÍMBOLO	UNIDAD
1	301	ABS	1	Acrílico de medio impacto	Masa:	3507,4	(g)	gramos
			1	Bronce Latón	Volumen:	1416581,7	(mm ³)	milímetros cúbicos
2	93	ABS	2	Bronce Latón	Area de superfi e:	2048372,1	(mm ²)	milímetros cuadrados
3	68	ABS	N/A					
4	49	ABS	N/A		Centro de masa:	x =133.15	(mm)	milímetros
						y =233.23		
TOTAL	511	ABS	4			z =231.33		

Tabla 7. Parámetros de Construcción. Fuente: (Propia).

Para la construcción final son tenidas en cuenta las condiciones de diseño del sistema electromecánico propuesto haciendo uso de herramientas didáctico-pedagógicas LEGO Education, generando resultados constructivos satisfactorios en parámetros de funcionalidad y eficiencia.

6.3. Resultados de programación, control y puesta a punto

Mediante el desarrollo del proyecto, se implementa la codificación del sistema electromecánico, utilizando las herramientas de software propias de la marca *LEGO education MINDSTORMS EV3*. La evaluación de los algoritmos de programación

respecto a las condiciones exigidas por el mecanismo permite el control del dispositivo en los parámetros de eficiencia, fuerza y precisión de los actuadores, determinados en el estudio dinámico del sistema electromecánico.

La figura a continuación muestra el proceso de ejecución paso a paso de las rutinas de programación establecidas para el cumplimiento de las tareas asignadas al sistema electromecánico objeto de estudio, una vez realizadas las pruebas de funcionamiento y puesta a punto:


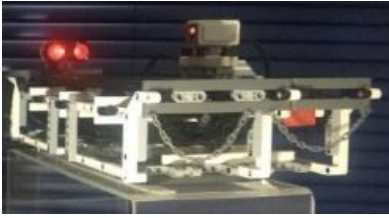

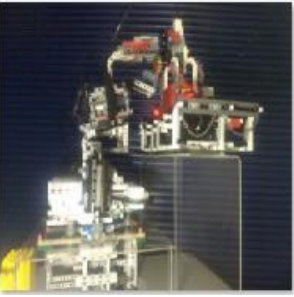
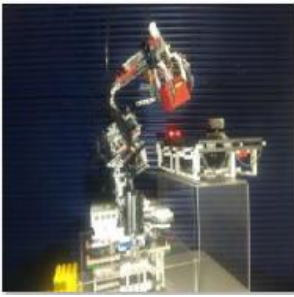
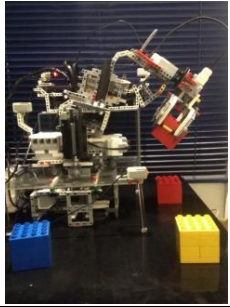
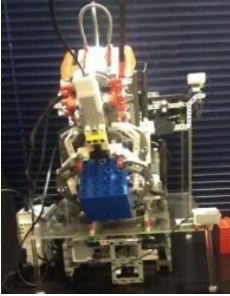
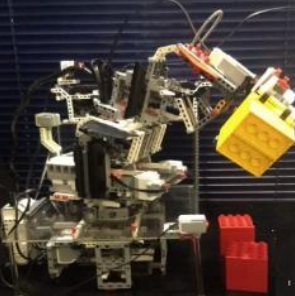

PROGRAMACIÓN SISTEMA ELECTROMECAÍNICO		
RUTINA DE SELECCIÓN DE PRODUCTOS		
a. POSICIÓN 0	b. DETECCIÓN Y UBICACIÓN DE OBJETO , DETERMINACIÓN DE COLOR	c. POSICIÓN 1
		
d. POSICIÓN 2	e. POSICIÓN 3	f.1. POSICIÓN 4
		
f.2. POSICIÓN 5	f.3. POSICIÓN 6	g. POSICIÓN 0
		

Figura 73. Rutinas de proceso. Fuente: (Propia).

- a. Posición 0: Se determina la ubicación del dispositivo para el inicio de las rutinas de selección (Posición Home).
- b. Detección de objetos: Los cuboides de colores se disponen en la banda transportadora. Los sensores determinan la rutina a ejecutar, dependiendo del color del objeto y ubican la posición para la captura por parte del efector del manipulador.
- c. Posición 1: Levantamiento del brazo para permitir la posición de giro.
- d. Posición 2: Captura del objeto.
- e. Posición 3: Levantamiento del objeto.
- f. Traslado de objetos determinados por su color: Producto conforme 1 (rojo) y 2 (azul), Producto No Conforme 3 (amarillo).
- g. Posición Home: Retorno a posición inicial, reinicio del bucle de programación.

6.4. Consolidado de resultados

Los resultados numéricos obtenidos por los métodos descritos se consolidan en la tabla a continuación. Se determinan los valores de potencia mecánica definidos por la configuración de cada articulación, teniendo en cuenta la relación de transmisión aplicada:

Los tiempos de operación se controlan de manera eficiente, teniendo en cuenta las condiciones del entorno y los parámetros descritos.

La versatilidad de las herramientas didáctico-pedagógicas LEGO Education permite la construcción y rectificación mecánica del prototipo según las necesidades y parámetros de ingeniería, así como generar estrategias de construcción y pruebas de funcionamiento reales.

SISTEMA ELECTROMECAÁNICO													
PARÁMETROS DE DISEÑO													
ARTICULACIÓN	TORQUE DE ARRANQUE			RELACIÓN DE TRANSMISIÓN		TORQUE DE SALIDA		VELOCIDAD DE SALIDA		POTENCIA MECÁNICA MÁXIMA		TORQUE MIN. REQUERIDA	
	TIPO DE MOTOR	VALOR	UNIDAD			VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
0	L	0,43	(N.m)	72	1	30,96	(N.m)	0,254	(rad/s)	7,864	(W)	3,71	(N.m)
1	L	0,43	(N.m)	72	1	61,92	(N.m)	0,254	(rad/s)	15,728	(W)	1,576	(N.m)
	L	0,43	(N.m)	72	1								
2	M	0,15	(N.m)	24	1	3,6	(N.m)	1,134	(rad/s)	4,082	(W)	0,507	(N.m)
3	M	0,15	(N.m)	4	1	0,6	(N.m)	9,075	(rad/s)	5,445	(W)	0,105	(N.m)
EF	M	0,15	(N.m)	24	1	3,6	(N.m)	1,134	(rad/s)	4,082	(W)	0,049	(N.m)
OBSERVACIONES:	Convenciones:			Newton*metro (N.m)				radianes por segundo (rad/s)				Watt (W)	
	Todos los motores funcionan con voltaje de entrada de 9V.												

Tabla 8. Análisis Dinámico, parámetros de diseño. Fuente : (Propia).

Para la implementación del diseño constructivo se tienen en cuenta los resultados obtenidos por medio de las estrategias expuestas. El sistema electromecánico, controlado por cuatro Grados de libertad, tres articulaciones (además de la articulación 0) y compuesto por 4 eslabones, permite determinar la posición y orientación del efector final de manera eficiente, de igual forma, es posible obtener las velocidades angulares de las articulaciones secuencialmente con el fin de determinar y controlar las condiciones idóneas de funcionamiento del prototipo.

El control de posicionamiento del dispositivo se facilita al hacer las modificaciones en los parámetros de programación, generando resultados positivos de funcionalidad durante las pruebas desarrolladas.

En la gráfica correspondiente a cada trama de desplazamiento del efector final, se identifican, por medio del uso de la GUI desarrollada en el programa para análisis matemático Matlab, los parámetros de posicionamiento correspondientes a la cinemática directa, que entrega los resultados de posición final. A su vez, el aplicativo determina el análisis cinemático inverso, el cual establece la posición inicial del sistema electromecánico en cada cadena cinemática.

A continuación, se consolidan los resultados obtenidos en las pruebas descritas:

- **Cadena cinemática 0 – 1:**

Se determina la ubicación del dispositivo para el inicio de las rutinas de selección (Posición Home o 0), el sistema se desplaza a la posición 1, el efector se eleva y posiciona.

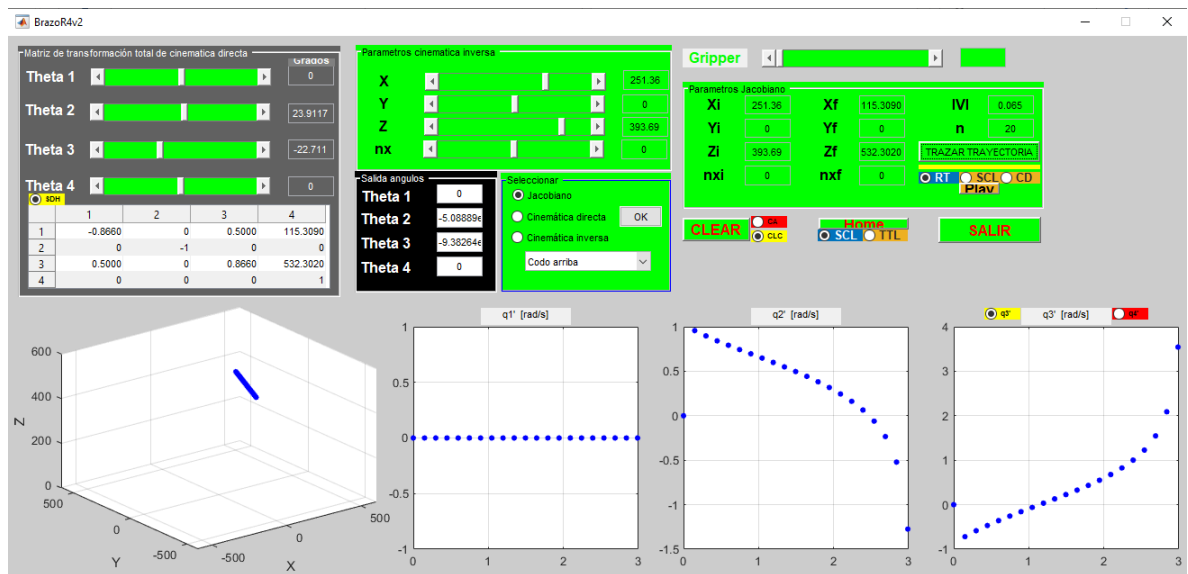


Figura 74. Cadena cinemática GUI, Trama 0 - 1. Fuente: (Propia).

El análisis permite determinar los resultados obtenidos en cada articulación, estos sin ubicados en las tablas correspondientes a cada trayectoria:

- **Articulación:** Donde se ubica la salida de potencia del sistema motor que determina cada GDL.
- **Potencia programada:** Parámetro establecido en las rutinas de control en el software de programación.

- Potencia aplicada: Determinada por el valor de potencia máxima entregado por cada sistema de transmisión en relación con el porcentaje de potencia programado.
- Torque de funcionamiento: Se establece teniendo en cuenta el valor de torque máximo entregado por cada sistema de transmisión mecánica correlacionado con los parámetros de programación.
- Velocidad de funcionamiento: Se obtiene operando los parámetros máximos de velocidad de los sistemas de transmisión y el porcentaje utilizado en el ejercicio de programación.
- Posicionamiento: Determinado por el análisis realizado en el GUI, el cual permite establecer los valores ideales en los ángulos de posición que controla cada articulación para la ubicación ideal del efector final.

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 1 - 2										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
0		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK
1	(+)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	22°	OK
2	(+)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	(-)23°	OK
3		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK

Tabla 9. Cadena cinemática, Posición 0 - 1. Fuente: (Propia).

El análisis anterior, se establece de la misma manera para las tramas subsecuentes en el funcionamiento del sistema electromecánico.

- Cadena cinemática 1 – 2:

Una vez realizado el desplazamiento del efector hasta la posición superior, se permite el giro del sistema, el dispositivo se posiciona y realiza la captura del objeto.

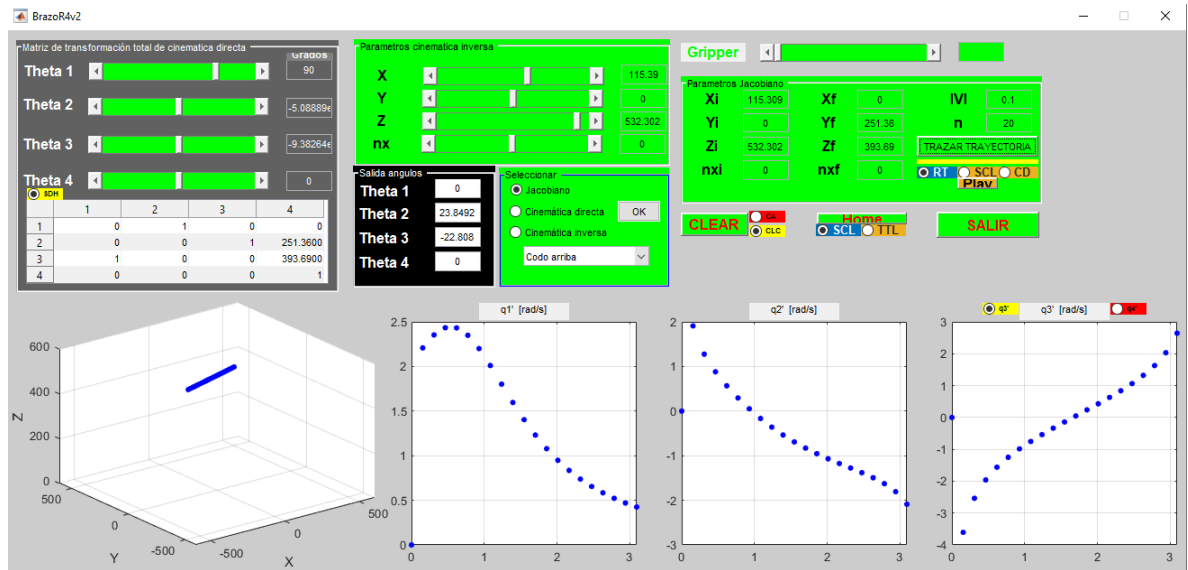


Figura 75. Cadena cinemática GUI, Trama 1 - 2. Fuente: (Propia).

Teniendo en cuenta la descripción expuesta en el Ítem anterior, se obtienen los resultados a continuación:

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 1 - 2										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
0	(-)	40	3,145536	(W)	12,384	(N.m)	0,1016	(rad/s)	90°	OK
1	(-)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	0°	OK
2	(-)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	0°	OK
3		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK

Tabla 10. Cadena cinemática, Posición 1 - 2. Fuente: (Propia).

- **Cadena cinemática 2 – 3:**

El sistema electromecánico levanta el objeto y lo ubica para la ejecución de las rutinas dependientes por parámetros de color en el objeto.

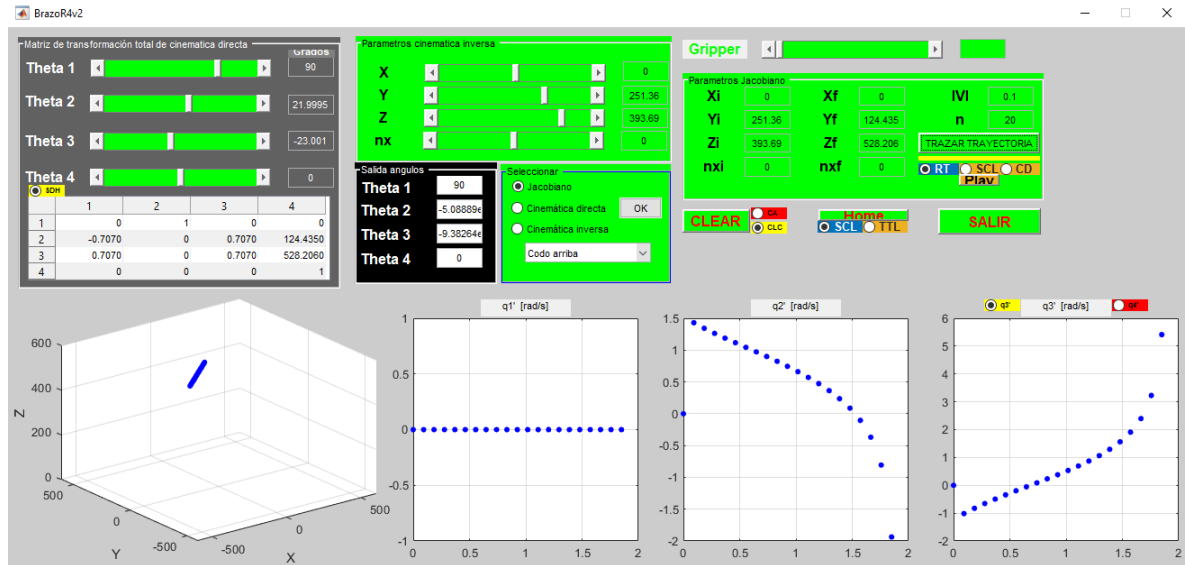


Figura 76. Cadena cinemática GUI, Trama 2 - 3. Fuente: (Propia).

Teniendo en cuenta la descripción expuesta en el Ítem inicial, se determinan los resultados a continuación:

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 2-3										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
0		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	90°	OK
1	(+)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	22°	OK
2	(+)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	(-)23°	OK
3		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK

Tabla 11. Cadena cinemática, Posición 2 - 3. Fuente: (Propia).

- Cadena cinemática 3 – 4:

Objeto de color rojo. El sistema traslada el Producto conforme 1 a la posición final determinada:

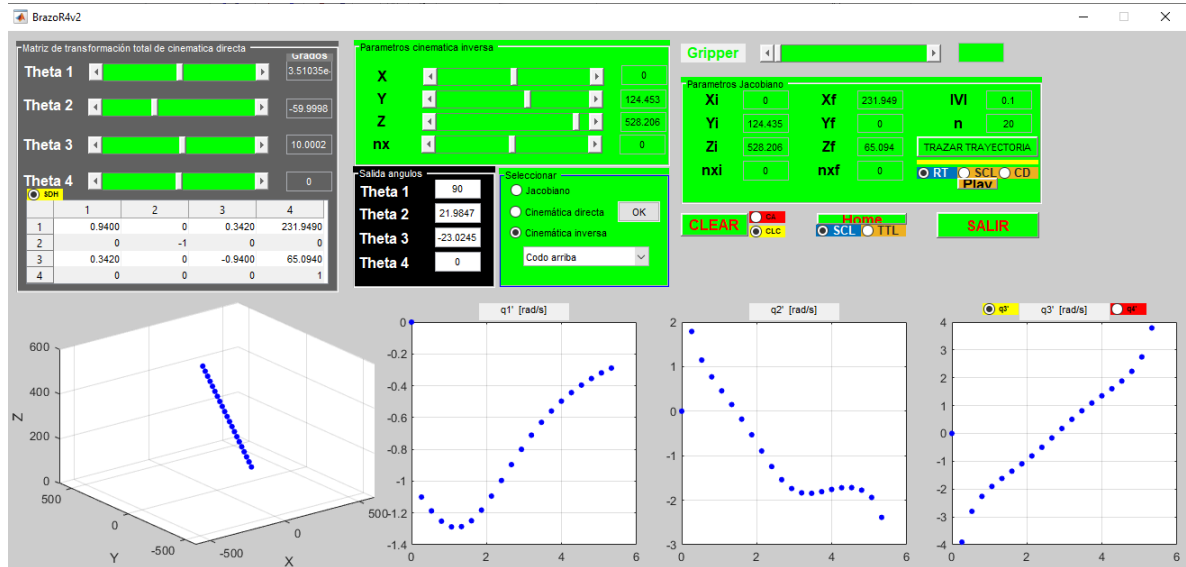


Figura 77. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 4. Fuente: (Propia).

A continuación, se determinan los parámetros correspondientes a la trama de funcionamiento 3 - 4:

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 3-4										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
0	(+)	40	3,145536	(W)	12,384	(N.m)	0,1016	(rad/s)	0°	OK
1	(-)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	(-)-60°	OK
2	(-)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	10°	OK
3		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK

Tabla 12. Cadena cinemática, Posición 3 - 4. Fuente: (Propia).

- Cadena cinemática 3 – 5:

Objeto de color azul. El sistema traslada el producto conforme 1 hacia la posición final determinada:

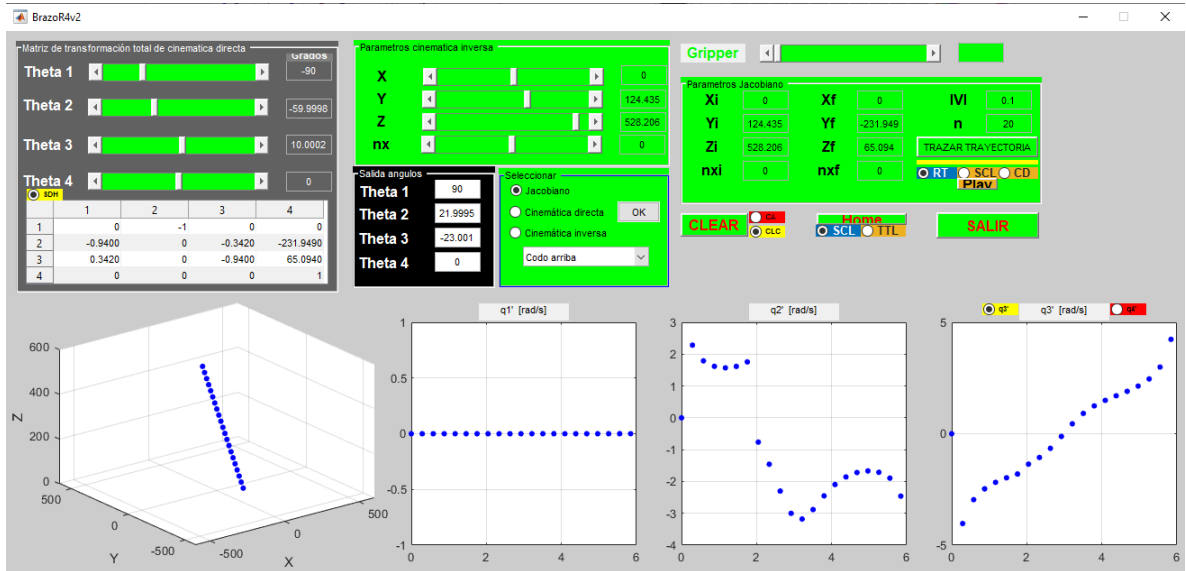


Figura 78. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 5. Fuente: (Propia).

A continuación, se obtienen los parámetros de análisis correspondientes a la trama de funcionamiento 3 - 5:

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 3-5										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
0	(+)	40	3,145536	(W)	12,384	(N.m)	0,1016	(rad/s)	(-)-90°	OK
1	(-)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	(-)-60°	OK
2	(-)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	10°	OK
3		0	0	(W)	0	(N.m)	0	(rad/s)	0°	OK

Tabla 13. Cadena cinemática, Posición 3 - 5. Fuente: (Propia).

- Cadena cinemática 5 – 6:

Trayectoria determinada para los productos No Conformes (amarillo):

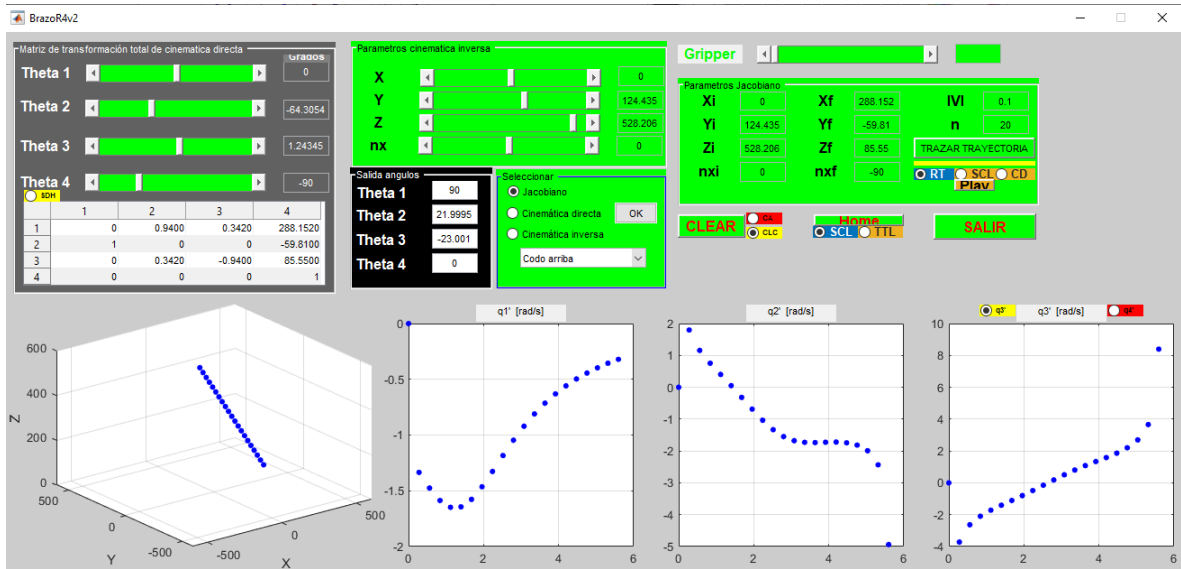


Figura 79. Cadena cinemática GUI, Trama 3 - 6. Fuente: (Propia).

A continuación, se exponen los parámetros establecidos para la trama de funcionamiento 3 – 6, de productos No conformes:

CADENA CINEMÁTICA POSICIÓN 3-6										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD		
0	(+)	40	3,145536	(W)	12,384	(N.m)	0,1016	(rad/s)	0°	OK
1	(-)	50	7,864	(W)	30,96	(N.m)	0,127	(rad/s)	(-)-60°	OK
2	(-)	50	2,041	(W)	1,8	(N.m)	0,567	(rad/s)	10°	OK
3	(+)	20	1,089	(W)	0,12	(N.m)	1,815	(rad/s)	(-)-90°	OK

Tabla 14. Cadena cinemática, Posición 3 - 6. Fuente: (Propia).

Al desarrollar la rutina completa de traslado de objetos, el sistema electromecánico retorna a posición inicial (Posición Home), reiniciando el bucle de codificación asignado.

Para efectos de los cálculos cinemáticos, los parámetros de funcionamiento del efector final se analizan de forma independiente, teniendo en cuenta los métodos establecidos para tal fin:

EFECTOR FINAL										
PARÁMETROS DE PROGRAMACIÓN									POSICIONAMIENTO	
ARTICULACIÓN	POTENCIA PROGRAMADA		POTENCIA APLICADA		TORQUE DE FUNCIONAMIENTO		VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO		ÁNGULO	FUNCIONAMIENTO
	SENTIDO	%	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	
EF	(+/-)	100	4,0824	(W)	3,6	(N.m)	1,134	(rad/s)	(+/-)90°	OK

Tabla 15. Análisis cinemático Efector Final. Fuente: (Propia).

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el estudio de la documentación teórica. A continuación, se exponen las conclusiones generadas del presente trabajo integral de grado:

- El análisis de las características de ingeniería en dispositivos electromecánicos permite el diseño pertinente de prototipos, cumple con requerimientos equivalentes para su implementación a nivel industrial en parámetros de precisión y adaptabilidad.
- La obtención de resultados teóricos y la aplicación de parámetros de ingeniería al algoritmo de control de trayectorias en el software de programación fomenta la eficiencia del sistema de potencia del dispositivo, teniendo en cuenta que:
 - Los motores asignados a cada eslabón trabajan de manera eficiente con potencias que oscilan entre el 10 y 100%.
 - Es posible aumentar el torque de trabajo de los actuadores en relaciones de hasta 72 veces, respecto al torque de fábrica, por medio de sistemas de transmisión mecánica.
- Los tiempos de operación se controlan de manera eficiente, teniendo en cuenta las condiciones del entorno y los parámetros descritos.
- La versatilidad de las herramientas didáctico-pedagógicas LEGO Education permite la construcción y rectificación mecánica del prototipo según las necesidades y parámetros de ingeniería, así como generar estrategias de construcción y pruebas de funcionamiento reales.
 - Se desarrollan 9 versiones constructivas, analizando funcionamiento y operación.

- Se derivan resultados frente a la implementación de los materiales utilizados, el análisis permite determinar necesidades frente al cambio en el material de los ejes sometidos a mayor esfuerzo cortante, teniendo en cuenta los requerimientos determinados por el estudio de diseño del prototipo y las características de las curvas esfuerzo – deformación de los elementos utilizados.
 - Se determinan decisiones de diseño para ejes especiales, mecanizando en material diferente al del fabricante, conservando la geometría.
- El material LEGO Educación EV3 permite la interacción entre los sistemas electrónicos, el software MindStorms LEGO Education EV3 y los algoritmos de programación y control utilizados, proporcionando herramientas para diseñar y evaluar algoritmos que permitan realizar los movimientos deseados y la aplicación de fuerzas exigidas por el prototipo.
- Como se indica en los resultados, el sistema electromecánico funciona de manera satisfactoria, alcanza las tramas y posiciones indicadas en su análisis dinámico para las trayectorias del efector final, controladas por los cuatro grados de libertad determinados.
- El establecimiento de los parámetros de ingeniería para un dispositivo de manipulación automática, con los grados de libertad determinados para el sistema electromecánico objeto de estudio, requiere el conocimiento extensivo previo de modelos dinámicos especializados del campo de la robótica aplicada. Por esta razón, el presente trabajo integral de grado requirió de un ejercicio de consulta exhaustivo frente a la temática específica y de pruebas recurrentes de control y funcionalidad.
- A su vez, se hace necesario el estudio a fondo de herramientas para el análisis de datos como SolidWorks y Matlab, lo que permite fortalecer y ampliar los conocimientos adquiridos durante las prácticas de laboratorio desarrolladas en la formación universitaria y fundamenta métodos de investigación bajo el

enfoque de las ciencias, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas, coincidentes con los enfoques globales de la metodología STEM.

- El uso de los ambientes de aprendizaje LEGO Education, sus herramientas didáctico-pedagógicas y el aprendizaje basado en proyectos, potencia la aplicación de conceptos de ingeniería, fomenta el interés por desarrollar análisis de parámetros teóricos, incentiva el conocimiento en áreas de la revolución de la industria 4.0. así como, la automatización y control de sistemas industriales de producción equivalentes.
- Los objetivos propuestos se cumplen a cabalidad, teniendo como punto de partida el diseño original, los parámetros establecidos en los estudios dinámicos y la automatización y control del sistema electromecánico.

CAPÍTULO 8. TRABAJO FUTURO.

Teniendo en cuenta el análisis documental y los ejercicios de prueba realizados, se determinan las siguientes posibilidades para el fortalecimiento del proyecto y los resultados del sistema electromecánico:

- La simulación constructiva en programas de diseño especializado como SolidWorks, puede permitir el estudio de parámetros de ingeniería con un alcance superior en el análisis paramétrico de los resultados. Para esto se requiere contar con equipos de cómputo sofisticados, que cumplan con los requerimientos de máquina específicos para diseño mecánico.
- La implementación del proyecto abre la posibilidad de analizar prototipos con mayor nivel de complejidad, aumentando la cantidad de grados de libertad y articulaciones, los cuales requieren de estudios prolongados de aplicación que pueden ser desarrollados en ambientes de aprendizaje especializados

como la “Fábrica Didáctica”, adquiridos por la Universidad Antonio Nariño y que son distribuidos por empresas colombianas como ADTECH S.A.

- Es posible desarrollar prototipos con características técnicas superiores, de igual manera se genera la oportunidad de realizar estudios de materiales en laboratorios especializados y la combinación de estos con herramientas constructivas y motores industriales.
- Desarrollar ejercicios de control del sistema por medio del software Matlab y sus diferentes extensiones, analizando los parámetros de compatibilidad entre las diversas herramientas de prototipado.
- Es posible implementar ejercicios de programación avanzada haciendo uso de lenguajes de codificación como C++, Micro Python, LabVIEW, entre otros, compatibles con el Kit LEGO Education EV3.

BIBLIOGRAFÍA

- ADTECH S.A. (2010). Ambientes de aprendizaje para la educación en tecnología. Bogotá.
- Alcalá., U. d. (2019). Ejemplos de la industria 4.0. Madrid.: Universidad de Alcalá.
- Barrientos, A. P. (2007). Fundamentos de Robotica. Madrid: MacGraw Hill/interamericana.
- Christopher Beland, W. C. (2000). LEGO Mindstorms. The Structure of an Engineering (R)evolution.
- Corke, P. I. (2016). A computer tool for simulation and analysis. the Robotics Toolbox for MATLAB.
- Corporation, D. S. (2019). Solidworks. USA: Dassault Systemes.
- Craig, J. J. (2006). Robotica. Mexico: Pearson Educacion.
- Daily Milanés Hermosilla, A. C. (2016). Generación de trayectorias para el brazo robótico. SCielo.
- Daniel Zaldivar Navarro, E. V. (2018). LEGO EV3 Programacion para Robots. Madrid: Ra-Ma.
- Dassault Systemes SolidWorks Corporation. (1995-2018). Introducción a SOLIDWORKS.
- David, R. (13 de Junio de 2013). Como LEGO se apodero del mundo. Expreses.
- Elizondo, J. J. (2002). Matlab e Interfaces Gráficas. Baja California: Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana.
- Foix, S. C., & Costa, D. C. (2001). Teoría de máquinas. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.
- Gallardo, S. (2018). Técnicas y Procesos en Instalaciones Domóticas y Automáticas. España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Hedrich, E. M. (2014). 150 Proyectos con LEGO Mindstorms-Tecnología-Instrumentación-Robótica. España: Premiá de Dalt, Barcelona.
- Ingenieria., F. p. (2008). Serway y John W. Jewett, Jr. Mexico D.F.: Cenage learning.
- LEGO, A. C. (2013). tecnología EV3 LEGO MINDSTORMS. Dinamarca: LEGO Group.
- Miravete Antonio, L. E. (2002). Los transportes en la Ingenieria Industrial. Barcelona España: Editores Reverte S.A.
- Molina, J., Cánovas Rodriguez, F. J., & Ruz, F. (2007). Motores y máquinas Eléctricas.undamentos de electrotecnia para ingenieros Alfaomega. España: Alfaomega - Marcombo.

Mott, R. L. (2016). Diseño de elementos de máquinas. Mexico: Prentice Hall.

Newell., J. (2010). Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería. México: Alfaomega Grupo Editor.

Oleducador . (2016). STEM y sus aportes a la educacion. Oleducador .

Revista Dinero . (2017). Sin Marcha atras: La automatizacion será una realidad en Colombia . Revista Dinero .

Revista Semana Educación. (2019). Oficios mas allá de una carrera profesional. Semana Educación.

Richard G. Budynas, J. K. (2008). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Mexico D.F.: McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A. de C.V.

Roa, A. L. (2002). Cintas Transportadoras. España: Libreria Artdinamica.

Robótica, I. a. (Irene Alvares Caro). 2017. España: Dextra Editoria.

Román., J. L. (2019). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Codiinforme, 2.

S.C, D. C. (2017). Automatización Robótica de Procesos (RPA). Change .

Serope Kalpakjian, S. R. (s.f.). Manufactura, ingeniería y tecnología. España: Pearson .

The MathWorks, I. (1994-2019). Robótica y sistemas autónomos. MATLAB y Simulink.

CONSULTAS EN PÁGINAS ELECTRÓNICAS

3D'lires. (05 de 10 de 2014). 3D'lires. Obtenido de <https://antho3dlires.wordpress.com/2014/10/05/dimensions-des-poutres-technic/>

The LEGO group. (15 de 03 de 2020). Historia de LEGO. Obtenido de <https://www.lego.com/en-us/lego-history>

3D'lires. (05 de 10 de 2014). 3D'lires. Obtenido de <https://antho3dlires.wordpress.com/2014/10/05/dimensions-des-poutres-technic/>

Adolfo León Arenas Landínez, K. J. (2012). Diseño en ingeniería, una mente creativa. *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference*.

ANEXOS

A. Anexo (1): Manual de usuario LEGO education MINDSTORMS EV3.

B. Anexo (2): Consolidado de piezas y ensambles desarrollado en software de diseño SolidWorks.

**C. Anexo (3): Guía estudio elemental
kit LEGO education MINDSTORMS
EV3 45544.**

D. Anexo (4): Interfaz Gráfica de usuario (GUI) desarrollada en software de análisis matemático Matlab.

E. Anexo (5): Video pruebas de funcionamiento.