

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERA E INGENIERO ELECTRÓNICOS**

**TEMA:  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL  
POSICIONAMIENTO DE UN ROBOT STEWART-GOUGH DIDÁCTICO,  
PARA SEGUIR EL MOVIMIENTO DE UN FOCO DE LUZ**

**AUTORES:  
MAYRA ESTEFANÍA ALTAMIRANO CHANGOLUISA  
MICHAEL ARNALDO ROBAYO ESCOBAR**

**TUTOR:  
JUNIOR RAFAEL FIGUEROA OLMEDO**

**Quito, Marzo del 2017**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Altamirano Changoluisa Mayra Estefanía y Robayo Escobar Michael Arnaldo, con documento de identificación N° 1714190558, 1718870312 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación intitulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL POSICIONAMIENTO DE UN ROBOT STEWART-GOUGH DIDÁCTICO, PARA SEGUIR EL MOVIMIENTO DE UN FOCO DE LUZ.", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a Electrónico/a, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

  
.....  
Altamirano Changoluisa Mayra  
Estefanía  
C.I: 1714190558  
Marzo, 2017

  
.....  
Robayo Escobar Michael Arnaldo  
C.I: 1718870312  
Marzo, 2017

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL POSICIONAMIENTO DE UN ROBOT STEWART-GOUGH DIDÁCTICO, PARA SEGUIR EL MOVIMIENTO DE UN FOCO DE LUZ**, realizado por Altamirano Changoluisa Mayra Estefanía y Robayo Escobar Michael Arnaldo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Marzo 2017



.....  
Figueroa Olmedo Junior Rafael  
C.I. 0802820183

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	CAPITULO 1 .....	1
1.1	Planteamiento del problema .....	1
1.2	Problema de estudio .....	1
1.3	Justificación.....	2
1.4	Objetivos.....	2
1.4.1	Objetivo general .....	2
1.4.2	Objetivos específicos .....	2
1.5	Propuesta de solución.....	3
1.6	Metodología.....	3
1.7	Grupo objetivo.....	4
2.	CAPITULO 2 .....	5
2.1	La Robótica y la Automatización Industrial.....	5
2.2	Manipuladores Robóticos.....	6
2.2.1	Clasificación de los Robots Manipuladores .....	7
2.2.2	Robots paralelos .....	7
2.3	Plataforma Stewart – Gough .....	10
2.3.1	Simulador ACFS .....	11
2.3.2	Dispositivo Médico Da Vinci.....	12
2.3.3	Robot Posicionador para Espejo de Telescopio Secundario M2 .....	13
2.3.4	Robot Posicionador tipo Hexápodo para Secundario Solar .....	14
2.3.5	Manipulador de Soldadura .....	14
2.4	Materiales y Equipos Utilizados en el Proyecto.....	15
2.4.1	Actuadores Lineales .....	15
2.4.2	Driver Motor L298N.....	16

2.4.3	Tarjeta Arduino Mega.....	17
2.4.4	Panel Fotovoltaico.....	18
2.4.5	Articulación Tipo Rótula.....	19
2.4.6	Articulación Universal o Cardan.....	20
2.5	Modelo Cinemático de la Plataforma Stewart-Gough.....	20
2.5.1	Cinemática Diferencial – Jacobiana.....	24
2.5.2	Optimización Cinemática de la Plataforma Stewart Gough (SGP) .....	26
2.5.3	Restricciones de las Junturas Pasivas.....	28
2.5.4	Restricciones de los Actuadores Lineales .....	29
2.5.5	Espacio de Trabajo de la Plataforma Stewart Gough (SGP).....	31
3.	CAPITULO 3 .....	33
3.1	Implementación Mecánica de la Plataforma Stewart Gough (SGP) .....	34
3.1.1	Implementación de las Base Fija y de la Plataforma Móvil Stewart – Gough .....	34
3.1.2	Base Fija de la Plataforma Stewart Gough .....	37
3.1.3	Plataforma Móvil de la Plataforma Stewart Gough .....	38
3.2	Dimensionamiento de los Paneles Fotovoltaicos usados como Sensores .....	38
3.3	Implementación Electrónica del Circuito de Control de los Actuadores .....	40
3.4	Implementación Eléctrico - Electrónico del Circuito de Control de Luces.....	42
3.5	Implementación de la Interfaz de Usuario.....	42
3.6	Programación de la Plataforma Mediante Software de Arduino .....	45
3.7	Programación en el Software Matlab utilizando Librerías de Arduino.....	47
3.8	Configuración de las Señales PWM para el Control de los Actuadores Lineales .....	48
3.9	Funcionamiento .....	49
3.9.1	Principios del Control de Lazo Cerrado (Feedback).....	51

3.9.2	Comandos de Programación Matlab - Arduino .....	52
4.	CAPITULO 4.....	55
4.1	Pruebas .....	55
4.2	Resultados.....	56
5.	CAPITULO 5.....	60
5.1	Conclusiones.....	60
5.2	Recomendaciones.....	62
6.	Referencias.....	63
7.	Anexos.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Cinemática de un robot;(a) Serial;(b) paralela.....	7
Figura 2.2. Simulador de movimiento de Klaus Cappel, construido durante los años sesenta. ....	8
Figura 2.3. Esquema en 3D del mecanismo paralelo tipo plataforma Stewart-Gough. ...	11
Figura 2.4. Simulador de movimiento de Flight Safety. ....	12
Figura 2.5. Consola Esclava, Robot Da Vinci. ....	13
Figura 2.6. Robot posicionador montado en el GTM .....	13
Figura 2.7. Antena de posicionamiento (izq.); hexápodo posicionamiento (der.) RAMEM .....	14
Figura 2.8. FANUC F-200iB .....	15
Figura 2.9. Actuador lineal de 100 mm (L16-P).....	16
Figura 2.10. Driver motor L298N.....	17
Figura 2.11. Tarjeta Arduino Mega.....	17
Figura 2.12. Distribución de pines de la Tarjeta Arduino Mega 2650.....	18
Figura 2.13. Panel solar monocristalino.....	19
Figura 2.14. Rotula de dirección.....	19
Figura 2.15. Cojinetes de agujas Juntas universales .....	20
Figura 2.16. Esquema de la Plataforma Stewart-Gough con la estructura de base y móvil. ....	21
Figura 2.17. Ángulos de navegación: elevación, balanceo y dirección. ....	23
Figura 2.18. Esquemas de la plataforma de la Plataforma Stewart Gough (SGP): Base móvil, base fija y posición neutral. ....	27
Figura 2.19. Bosquejo del actuador lineal Firgelli tipo P. ....	31
Figura 3.1 Prototipo de la plataforma Stewart Gough (SGP). ....	33
Figura 3.2. Modelo-CAD de un actuador lineal.....	34
Figura 3.3. Forma y configuración de las bases del robot .....	35
Figura 3.4. Ubicación gráfica para la colocación de las articulaciones. (Vista Inferior) .	35
Figura 3.5. (a) Actuador lineal adquirido, (b) Vástago del actuador separado del motor, (c) Vástago acoplado con la articulación tipo rotula., (d) Perno tipo esparrago acoplado a la articulación tipo rotula. ....	37

Figura 3.6. Implementación de base fija y acople de articulación tipo rotula. ....	37
Figura 3.7. Implementación del acople extensor .....	38
Figura 3.8. Paneles fotovoltaicos implementados en la base móvil como sensores. ....	39
Figura 3.9. Conexiones de los paneles fotovoltaicos .....	39
Figura 3.10. Implementación mecánica real de la plataforma Stewart-Gough.....	40
Figura 3.11. Bloque de conexión de la placa de control de los actuadores lineales. ....	41
Figura 3.12. Bloque de Conexión Luces. Ver Anexo 12. ....	42
Figura 3.13. Ventana de bienvenida para el control de la Plataforma Stewart Gough ...	43
Figura 3.14. Ventana de Control Manual para la Plataforma Stewart Gough .....	44
Figura 3.15. Ventana de Control Automático para la Plataforma Stewart Gough.....	45
Figura 3.16. Flujograma de control de los actuadores lineales. ....	46
Figura 3.17. Control de los actuadores por medio del monitor serie del IDE de Arduino .....	47
Figura 3.18. Instalador Paquete de Soporte Arduino-Matlab. ....	48
Figura 3.19. Código de programación para el control de velocidad con PWM.....	49
Figura 3.20. Barra de desplazamiento que permite el control manual de los actuadores.	49
Figura 3.21. Diagrama del funcionamiento del control automático de la plataforma Stewart-Gough. ....	50
Figura 3.22. Diagrama de proceso del control manual, automático y demostración de la plataforma Stewart-Gough. ....	51
Figura 3.23. Control del lazo cerrado implementado para la plataforma Stewart-Gough .....	52
Figura 3.24. Lectura de entradas en el software Matlab .....	52
Figura 3.25. Escritura de salidas (actuadores lineales). ....	53
Figura 3.26. Comando de reloj y almacenamiento en Excel.....	53
Figura 3.27. Orden de almacenamiento del comando de reloj.....	53
Figura 3.28. Comparación entre los valores de voltaje de los paneles fotovoltaicos.....	54
Figura 3.29. Condiciones para retomar la posición inicial.....	54
Figura 4.1. Funcionamiento de la plataforma móvil con respecto a la secuencia de luces .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Característica de los robots series y paralelos.....	9
Tabla 2.2. Comparación entre manipulador serial y paralelo. ....	10
Tabla 2.3. Funcionalidad de cada uno de los cables conectores del actuador lineal miniatura con retroalimentación .....	16
Tabla 2.4. Datos eléctricos panel fotovoltaico.....	19
Tabla 3.1. Coordenadas de la ubicación de los actuadores lineales tomando el sistema de referencia de la plataforma móvil. ....	36
Tabla 3.2. Coordenadas de la ubicación de los actuadores lineales tomando el sistema de referencia de la base fija.....	36
Tabla 3.3. Datos medidos entre los extremos de la plataforma Stewart-Gough. ....	36
Tabla 3.4. Configuración de pines de conexión en la placa de control para los actuadores lineales.....	41
Tabla 4.1. Descripción del contenido de cada grupo de motores.....	55
Tabla 4.2. Combinaciones posibles del orden de activación con respecto al grupo de sensores. ....	55
Tabla 4.3. Recopilación de los valores de voltaje de los tres paneles fotovoltaicos durante la incidencia de luz.....	56
Tabla 4.4. Posibles secuencias de encendido y apagado de las lámparas dicroicas led...57	
Tabla 4.5. Ejecución de movimientos de la primera secuencia de luces .....	58
Tabla 4.6. Ejecución de movimientos de la segunda secuencia de luces.....	58
Tabla 4.7. Ejecución de movimientos de la tercera secuencia de luces .....	58
Tabla 4.8. Ejecución de movimientos de la cuarta secuencia de luces .....	59

## **RESUMEN**

Este documento presenta la implementación de un sistema de control aplicado al posicionamiento de un robot Stewart-Gough didáctico, para seguir el movimiento de una fuente de luz. Se usó un control de lazo cerrado debido a que es necesario conocer el valor de los voltajes en cada uno de los sensores así también como las distancias de los actuadores lineales. Para la implementación mecánica de la plataforma Stewart-Gough fue necesario utilizar accesorios como las articulaciones tipo rótula prismática y universal que permiten los movimientos rotacionales y traslacionales de los actuadores lineales con respecto a la plataforma móvil y la base fija. En el control de lazo cerrado (Feedback) se realizaron distintas pruebas de calibración en los voltajes recibidos por los paneles fotovoltaicos y los actuadores lineales, a través de la conversión analógica digital (A/D) que proporciona la tarjeta Arduino Mega 2560 para sus correspondientes comparaciones y condiciones en la programación del software Matlab, obteniendo movimientos diferentes de la plataforma Stewart-Gough. Se desarrolló una interfaz humano-máquina (HMI) con características amigables para el usuario; la misma que consta de un control manual y automático, que posee 3 ventanas en las que el usuario podrá manejar de manera didáctica la plataforma Stewart-Gough desarrollada.

## **ABSTRACT**

This document presents the implementation of a control system applied to the positioning of a Stewart-Gough didactic robot, to follow the movement of a source of light. A closed loop control was used because it is necessary to know the value of the voltages in each of the sensors as well as the distances the linear actuators. For the mechanical implementation of the Stewart-Gough platform it was necessary to use accessories such as universal and rotary joints that allow the rotational and translational movements of the linear actuators with regard to the mobile platform and base it fixes. In the control of closed bow (Feedback) different tests of calibration were realized in the voltages got for the photovoltaic panels and actuators linear, across the analogical digital conversion (A/D) that provides the card Arduino Mega 2560 for his corresponding comparisons and conditions in the programming of the software Matlab, obtaining the movements different from the platform Stewart-Gough. There developed an interface human being - machine (HMI) with amicable characteristics for the user; same that consists of a manual and automatic control; that possesses 3 windows different from process in which the user will be able to handle in a didactic way the platform Stewart-Gough.

## INTRODUCCIÓN

Inicialmente el uso de los robots ha sido visto en líneas de producción de compañías automovilísticas de manufactura, sin embargo, ahora casi todas las compañías de manufactura han implementado áreas con un sistema robótico. Esto se debe principalmente al decrecimiento en los precios de los robots, mientras que el trabajo humano se ha visto incrementado. En el futuro los robots comenzarán a ser más inteligentes y podrán resolver varias tareas a la vez.

Entre las aplicaciones dentro de la industria se ha visto requerida la implementación de la plataforma Stewart-Gough (manipulador paralelo), debido a su baja inercia, además se utilizan en la industria en aplicaciones donde se necesitan altas velocidades y/o precisión (por ejemplo, montaje, manipulación, selección y colocación, mecanizado). La Plataforma Stewart-Gough consiste en el movimiento de una plataforma móvil conectada a múltiples patas que en su mayoría consisten en actuadores prismáticos conectados a la base de la plataforma a través de una articulación universal. De este modo las patas solo son expuestas a una tensión o compresión y no se doblan, lo que aumenta la precisión de posición y permite una construcción más ligera.

Además, las múltiples patas producen una alta rigidez en la estructura y una gran capacidad de carga útil. La desventaja de los manipuladores paralelos es su limitado espacio de trabajo, porque las patas pueden colisionar con las articulaciones pasivas, que tienen sus propios límites mecánicos.

# **CAPITULO 1**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta. Esta radiación solar controla el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos a través del control de procesos fotobiológicos. Por esta razón se observó dentro del sector agrícola y florícola que no existe un medio tecnológico a nivel nacional que mida y genere reportes de la mejor cantidad de luz solar a la que una planta debería estar expuesta para su desarrollo; motivo por el cual se construirá y programará un robot didáctico Stewart-Gough capaz de seguir el movimiento de una fuente de luz a través de sistema de control basado en un algoritmo de búsqueda y generación de reportes.

### **1.2 Problema de estudio**

Según los datos recolectados dentro del internet en el Ecuador no se ha encontrado información de proyectos aplicativos o relacionados a la búsqueda de una fuente de luz con la plataforma Stewart-Gough. Los únicos estudios existentes han sido para la obtención del título de tercer nivel en Ingeniería Mecánica o Electrónica; de la plataforma Stewart-Gough realizados por estudiantes egresados de diversas universidades. Por ejemplo: en la Sede Cuenca de la Universidad Politécnica Salesiana se realizó el estudio de controladores difusos usando la plataforma Stewart-Gough (Gonzales, 2011), además en la Escuela Politécnica Nacional se desarrolló la plataforma Stewart-Gough como un simulador de vuelo (Arias, 2013).

Debido a la carencia de proyectos aplicativos con la plataforma Stewart-Gough en el Ecuador se propone la implantación de un sistema de control aplicado al posicionamiento de un robot Stewart-Gough didáctico para seguir el movimiento de una fuente de luz.

Con este robot didáctico se pretende ayudar a los sectores agrícola, florícola y a las personas interesadas en trabajar con una mejor calidad de luz solar para aplicarlo en el cultivo de plantas.

### **1.3 Justificación**

Con la implementación de un sistema de control aplicado al posicionamiento del robot didáctico Stewart-Gough se propone llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos en el área de la robótica y los sistemas de control. Dentro de la agricultura y floricultura principalmente sería muy útil la existencia de un módulo buscador de luz con las características de una plataforma Stewart-Gough para determinar lugares adecuados para el cultivo de diversas plantas.

La finalidad del proyecto es dar a conocer el funcionamiento automático de la plataforma Stewart-Gough a nivel de los sistemas de control; conocimientos necesarios para las asignaturas relacionadas al campo de la Robótica. Existen ferias de ciencia y tecnología donde es posible mostrar este trabajo didáctico realizado en la Universidad Politécnica Salesiana.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Implementar un sistema de control aplicado al posicionamiento de un robot Stewart-Gough didáctico para seguir el movimiento de un foco de luz.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar la celda fotovoltaica acorde a la capacidad recepción de la mayor cantidad de luz.
- Construir la estructura mecánica del módulo didáctico de la plataforma Stewart-Gough a través de seis actuadores lineales, una base fija (chasis) y una base móvil para lograr los desplazamientos angulares máximos de 45 grados.
- Integrar una interfaz gráfica de usuario para el control del robot didáctico Stewart-Gough, tanto de forma manual como automática.
- Comprobar el funcionamiento del robot didáctico por medio de diferentes pruebas en las que se manipule varios ambientes de luminosidad.

## 1.5 Propuesta de solución

Este Proyecto Técnico propone la implementación de un módulo didáctico basado en una plataforma Stewart-Gough que seguirá la incidencia de una fuente de luz sobre tres paneles fotovoltaicos ubicados en la base móvil del robot, también tendrá desplazamientos angulares máximos a 45 grados; además del almacenamiento de los datos recibidos por los paneles fotovoltaicos.

## 1.6 Metodología

En este proyecto se implementará una plataforma Stewart-Gough con seis actuadores lineales y dos bases, una base fija y otra base móvil. Los actuadores estarán unidos a ambas bases siguiendo un diseño Stewart-Gough y con ellos se consigue el movimiento de la plataforma móvil, tanto de su posición final como su inclinación y elevación. El robot didáctico contará con los siguientes elementos y características:

- Una tarjeta electrónica destinada para el proceso de control de los actuadores y la lectura del potencial eléctrico del sensor.
- Actuadores lineales eléctricos Firgelli (L16P), 12VDC; 220mA; 15N; 3.3721 libra-fuerza (lbf); 10cm.
- Driver para motores (Puente H) similar al L298.
- Celdas Fotovoltaicas 5V; 0.4W; 80mA.
- Una tarjeta electrónica destinada para el proceso de control de las luces diodo-led 110 V que simulara el movimiento del sol con respecto a la tierra en una forma de luz artificial.

El sistema de control contará con las siguientes características:

- Una interfaz gráfica con un control manual y automático del robot didáctico Stewart-Gough desarrollada para el usuario, se observará la posición actual y la cantidad de luz medida en el instante de trabajo además del almacenamiento de los datos recibidos por los paneles fotovoltaicos.

En el robot didáctico Stewart-Gough se realizarán las siguientes pruebas:

- Movimientos en ángulos de inclinación y elevación mediante la calibración de cada uno de los actuadores lineales.
- Seguimiento de luz generada por el control a través de los leds diodos.

### **1.7 Grupo objetivo**

El desarrollo de este proyecto correspondiente a un sistema buscador de luz basado en una plataforma didáctica Stewart-Gough está dirigido a los estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana, para que puedan implementar nuevas aplicaciones asociadas a los sistemas de control en lazo cerrado. También estaría encaminado para floricultura, invernaderos, agrónomos y personas interesadas en instalación de equipos de energía solar.

## **CAPITULO 2**

### **FUNDAMENTACION TEÓRICA**

Las plataformas paralelas han sido ampliamente estudiadas en las últimas décadas debido a sus ventajas con respecto a los robots serie: mejor relación rigidez-carga, menor inercia, dinámica mejorada y una mayor precisión. Entre ellos, la plataforma Stewart-Gough, ha atraído el interés de muchos investigadores y todavía es objeto de varios proyectos de investigación importantes para muchas aplicaciones como en herramientas de posicionamiento, fresadoras, simuladores de vuelo, telescopios radiactivos, robots de cable impulsado por un dispositivo de apoyo para la rehabilitación y las intervenciones de cirugía.

#### **2.1 La Robótica y la Automatización Industrial**

La Robótica es la ciencia que estudia el diseño y la implementación de robots, conjugando múltiples disciplinas, como la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control, entre otras. Para definirlo en términos generales, un robot es una máquina automática o autónoma que posee cierto grado de inteligencia, capaz de percibir su entorno y de imitar determinados comportamientos del ser humano. Los robots se utilizan para desempeñar labores riesgosas o que requieren de una fuerza, velocidad o precisión que está fuera del alcance del ser humano. (García M. , 2016)

Los robots se usan en diversos ámbitos y para cumplir tareas variadas: desde los brazos robóticos (manipuladores robóticos) utilizados en la industria automotriz hasta el novedoso sistema quirúrgico Da Vinci, que permite practicar cirugías de alta complejidad poco invasivas y con una precisión sin precedentes; hasta los robots espaciales diseñados para explorar la superficie de planetas desconocidos, o el Nano colibrí, un pájaro utilizado para espionaje militar. Pero quizá los más llamativos sean los androides, que imitan la morfología, el comportamiento y el movimiento de los seres humanos. Uno de los más conocidos en la actualidad es ASIMO, pensado para llevar a cabo labores asistenciales y sociales. Aunque se encuentra en una etapa experimental, ASIMO es capaz de caminar o subir escaleras por sí solo. (García M. , 2016)

La automatización Industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano. En los últimos años, se ha estado desarrollado el sistema denominado SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), por medio del cual se pueden supervisar y controlar las distintas variables que se presentan en un proceso o planta. Para ello se deben utilizar diversos periféricos, software de aplicación, unidades remotas, sistemas de comunicación, etc., que le permiten al operador tener acceso completo al proceso mediante su visualización en una pantalla de computador.

Esto permite no solo supervisar el proceso sino tener acceso al historial de las alarmas y variables de control con mayor claridad, combinar bases de datos relacionadas, presentar en un simple computador, por ejemplo, una plantilla Excel, un documento Word, todo en ambiente Windows. (Pérez, 2015)

## **2.2 Manipuladores Robóticos**

Los manipuladores robóticos son dispositivos que han ganado aceptación en el medio industrial gracias a su capacidad de llevar a cabo un número variado de tareas con rapidez y precisión, además de que pueden adaptarse a diversas situaciones con sólo modificar el programa que comanda los movimientos de la máquina. (Correa, Vásquez, Ramírez, & Taborda, 2013)

El incremento de su uso también obedece a que permiten reducir costos, mejorar la calidad del producto, aumentar la producción, reducir desperdicios, mejorar la seguridad del puesto de trabajo y ahorrar espacio.

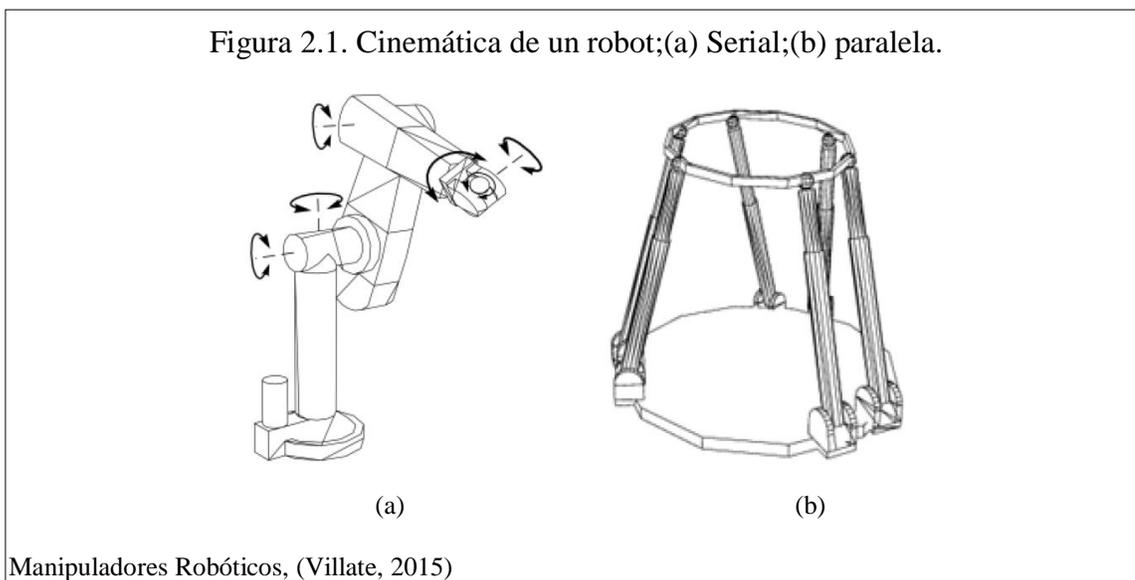
En todo manipulador se pueden distinguir cuatro componentes: mecánico, hardware, control y software, es la suma de ellos lo que hace que los manipuladores sean versátiles, inteligentes, robustos y de excelente repetibilidad. (Correa, Vásquez, Ramírez, & Taborda, 2013)

### 2.2.1 Clasificación de los Robots Manipuladores

Según su estructura cinemática los robots se pueden clasificar en seriales o paralelos. Un robot es serial cuando su estructura cinemática es una cadena de lazo abierto, tal como se muestra en la Figura 2.1. Los robots paralelos por su parte, se pueden definir como un mecanismo de cadena cinemática cerrada, está unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes.

Es paralelo si contiene tanto cadenas de lazo cerrado como de lazo abierto, incorporando eslabones llamados plataformas (Plataforma Móvil, Plataforma Base), unidas por articulaciones a los actuadores, en la mayoría de los casos se busca que los actuadores estén fijos a la base para mejorar la dinámica del robot. (Villate, 2015)

En este trabajo se va a utilizar un robot paralelo, por dicha razón solo se hará referencia a este tipo de robots.



### 2.2.2 Robots paralelos

Eric Gough estableció los principios básicos de un mecanismo que permite el posicionamiento y la orientación de una plataforma móvil. En 1965, D. Stewart publicó un artículo donde describe una plataforma de movimiento con 6 grados de libertad (GDL), mecanismo paralelo llamado Plataforma de Stewart-Gough destinado a trabajar como simulador de vuelo. El trabajo de Stewart hizo muchas sugerencias para los usos del

hexápodo que se convirtieron con el tiempo en realidad; hoy en día este mecanismo es aplicado en la aviación para simulación de aeronaves. Es Stewart quien introduce el mecanismo de la Plataforma Stewart-Gough en el mundo académico.

En 1962, el ingeniero Cappel Klaus, perteneciente al Instituto de Laboratorios de Investigación de Franklin en Filadelfia, propuso un hexápodo octaédrico al igual que Gough, estableciendo la pauta para el desarrollo de robots paralelos en la industria, también para ser utilizado como un simulador de movimiento. A Cappel se le concedió una patente para su invención en 1967 y se le considera como el tercer y último pionero en el campo de los robots paralelos.

El primer simulador de vuelo se construyó basado en el diseño de Cappel (Figura 2.2). Cappel también diseñó varios sistemas de robots paralelos para pruebas de vibración, sin embargo, habría de pasar un largo periodo de tiempo antes de que estos diseños fueran aceptados por la industria. Se pueden mencionar a estos tres hombres (Eric Gough, D. Stewart, y Klaus Cappel), como los verdaderos pioneros del robot paralelo, cuyo legado aún permite el estudio y creación de nuevas aplicaciones con mecanismos de este tipo.

Figura 2.2. Simulador de movimiento de Klaus Cappel, construido durante los años sesenta.



Simulador de vuelo basado en el diseño de Cappel, (Villate, 2015).

Los requerimientos a nivel industrial actualmente demandan mayores prestaciones en los procesos automatizados, de tal forma, que el empleo de robots en dichos procesos se encuentra en aumento. Los robots paralelos se han convertido en parte indispensable de la robótica tanto en la industria como en estudios académicos. La investigación en temas como la teoría de mecanismos, el análisis de la movilidad, la síntesis dimensional, la cinemática y dinámica, el modelado y optimización de diseño han permitido que el desarrollo de este tipo de robots vaya en aumento en las últimas décadas. En la Tabla 2.1, se muestra un cuadro comparativo entre un robot serie y paralelo.

Tabla 2.1. Característica de los robots series y paralelos.

<b>ROBOT</b>	
<b>SERIE</b>	<b>PARALELO</b>
Estructura poco rígida	Arquitectura más rígida
Baja relación carga/peso del manipulador	Relación carga/peso muy superior
Robot más pesado	Robot ligero
Baja precisión	Alta precisión
Precisión del posicionamiento. Los errores en las articulaciones crecen de elemento a elemento y se acumulan hasta el elemento terminal.	Los errores en las articulaciones afectan con el mismo orden de magnitud a la posición de la plataforma
Bajas velocidades y aceleraciones. Peores características dinámicas.	Altas velocidades y aceleraciones. Mejor respuesta dinámica
Cinemática simple	Cinemática compleja.
Resolución analítica de las ecuaciones.	Alto tiempo de computación.
Facilidad en el lazo de control	Dificultad en el control.
Amplio espacio de trabajo	Espacio de trabajo más reducido
Técnica de calibración resuelta	Calibración compleja. Problema abierto.
Posiciones singulares únicamente en el problema inverso.	Posiciones singulares más complejas en problemas directo e inverso.
Tecnología ya desarrollada	Nueva tecnología

Tabla de características de los robots en general, Fuente: (Villate, 2015)

Tabla 2.2. Comparación entre manipulador serial y paralelo.

Nivel	Características	Manipulador Serie	Manipulador Paralelo
<b>Mecanismo</b>	Inercia	Grande	Pequeño
	Volumen de trabajo	Grande	Pequeño
	Apariencia	Antropomórfica	Base estructural
	Fabricación	Difícil	Fácil
<b>Control</b>	Control de posición en el espacio de trabajo	Difícil	Fácil
	Control de fuerza en el espacio de trabajo	Fácil	Difícil
	Detección de fuerzas	Difícil	Fácil
	Error de posición	Acumulado	Media
	Error de control de fuerzas	Media	Acumulado
	Cerca de los puntos	Degeneración en el control de fuerzas	Disminución de la precisión de posicionamiento
		Movimientos grandes en el actuador	Fuerza grande en el actuador
Dinámica	Complicada	Mucho más complicado	

Tabla de comparaciones mecánicas y de control de los manipuladores., Fuente: (Villate, 2015).

### 2.3 Plataforma Stewart – Gough

Es un mecanismo paralelo como se observa en la Figura 2.3, constituido por una placa fija sujeta a tierra y otra placa móvil unida a la primera por medio de seis actuadores lineales (prismáticas activas).

Estos actuadores permiten que la placa móvil pueda moverse en el espacio con seis grados de libertad independientes (tres de desplazamiento y tres de rotación). Adicionalmente, los actuadores se unen a las placas por medio de juntas universales o esféricas (pasivas). Como característica propia de este mecanismo la carga se distribuye en todos los actuadores y de esta forma cada uno soporta una sexta parte de los esfuerzos, donde la tracción y compresión proporcionan gran rigidez a la plataforma.

Figura 2.3. Esquema en 3D del mecanismo paralelo tipo plataforma Stewart-Gough.



Mecanismo paralelo, (Anderson, 2014).

Las estructuras de tipo paralelo basadas en plataformas Stewart Gough, han despertado gran interés debido a sus ventajas en cuanto a su capacidad de manipular carga, precisión y velocidad de operación, permitiendo el desarrollo de aplicaciones diversas que abarcan desde los micro-robots posicionados, plataformas de gran capacidad, aplicaciones médicas, simuladores, robots manipuladores, robots experimentales, máquinas herramientas, entre otros.

A continuación, se describen algunas de las aplicaciones de la plataforma Stewart-Gough en diversas áreas de trabajo.

### **2.3.1 Simulador ACFS**

La Flight Safety es una empresa dedicada a la formación de la aviación a nivel mundial con más de 60 años de liderazgo en el entrenamiento de vuelos, en sus capacitaciones incluye cursos de diversos tipos de tecnología dentro de ellos la simulación de movimiento incluyendo plataformas de tipo Stewart Gough para sus cabinas. La empresa ha diseñado y fabricado diversos simuladores sofisticados y trabaja en coordinación con fabricantes de aviones y líneas aéreas de todo el mundo, incluido EE.UU. Militares y sus aliados.

Figura 2.4. Simulador de movimiento de Flight Safety.



Simulador ACFS, (FlightSafety, 2016)

### 2.3.2 Dispositivo Médico Da Vinci

Es un robot empleado para la cirugía mínimamente invasiva, como la laparoscopia. En estas intervenciones, el cirujano, solo utiliza información visual suministrada por una cámara fijada al endoscopio.

Hoy día, el sistema Da Vinci se ha convertido en un estándar de cuidado en los Estados Unidos para las diferentes especialidades de Urología, Ginecología, Cirugía General, de tórax, Cardio Vascular, Transoral y Pediátrica.

En esas especialidades quirúrgicas se ha logrado demostrar mejores resultados clínicos en los pacientes con la disminución en la estancia hospitalaria, disminuciones en transfusiones sanguíneas y disminución en complicaciones, convirtiéndose así, en la alternativa de mayor beneficio para cirujanos, pacientes e instituciones. (Moncada, 2014) El robot esclavo que se puede ver en la Figura 2.5, se encuentra constituido por tres brazos, uno de ellos contiene el manipulador para la cámara y los otros dos, los manipuladores de instrumentos que reproducen los movimientos de las manos del cirujano realizados desde la consola. (Mendoza & Perez, 2011)

Figura 2.5. Consola Esclava, Robot Da Vinci.



Robot esclavo, (Mendoza & Pérez, 2011).

### 2.3.3 Robot Posicionador para Espejo de Telescopio Secundario M2

El robot posicionador es un mecanismo que sirve para alinear y mantener enfocado el espejo secundario del Gran Telescopio Milimétrico. Es indispensable que este robot logre mantener la posición del espejo en el espacio con una exactitud menor a  $2\mu\text{m}$  para lograr que mantenga la distancia focal y la alineación.

En la Figura 2.6 se puede ver el robot posicionador con los 6 actuadores, seis juntas esféricas inferiores, seis juntas superiores, la plataforma fija inferior y móvil superior, montadas en el telescopio. (Villate, 2015)

Figura 2.6. Robot posicionador montado en el GTM



Robot posicionador de Telescopio, (Jáuregui, 2010)

### 2.3.4 Robot Posicionador tipo Hexápodo para Secundario Solar

Las aplicaciones de hexápodos para seguimiento solar se encuentran en alto grado de desarrollo debido a la búsqueda de los científicos de soluciones para la gran demanda de energía del mundo, no solo para consumo eficiente sino para producción sostenible de la energía.

Se emplean mecanismos tipo hexápodos como medio de posicionamiento de reflectores solares y de seguimiento del sol; el dispositivo permite una mayor rigidez que otros sistemas, consiguiendo un apuntamiento muy preciso e incrementando su desempeño. Un ejemplo de estos mecanismos se puede observar en la Figura 2.7, con los desarrollos de las empresas RAMEM S.A., BESEL S.A. y LIDAX INGENIERÍA.

Este manipulador está compuesto por juntas prismáticas y articulaciones esféricas (rótula) tanto en el suelo como en la fijación del panel, el posicionador admite diferentes tipos de control y actuadores diversos tanto hidráulicos, neumáticos, eléctricos etc.; su montaje, transporte y mantenimiento es relativamente sencillo.

Figura 2.7. Antena de posicionamiento (izq.); hexápodo posicionamiento (der.)

RAMEM



Mecanismos tipo hexápodos, (Jáuregui, 2010).

### 2.3.5 Manipulador de Soldadura

La alta precisión de posicionamiento y gran rigidez permiten a los robots paralelos como el Robot FANUC F-200iB que se observa en la Figura 2.8 sobresale en aplicaciones de

soldadura por arco debido a la posibilidad de mover rápidamente el efector final del manipulador de un punto dado a otro con bajo margen de error.

Posee 6 GDL, una arquitectura tipo Stewart-Gough, área de trabajo plana de 500x300 mm, repetibilidad de  $\pm 0.1$  m, velocidades máximas de avance de 300 y 150 mm/s, un peso de 15 kg y puede ser montado en el piso, la pared o el techo. Además, posee servomotores eléctricos de corriente alterna con tiempo de vida útil 31.000 horas, equipado con kits de blindaje EMI para TIG (GTAW), plasma (PAW) y corte por plasma (PAC).

Figura 2.8. FANUC F-200iB



Manipulador de soldadura, (Robotics, 2005)

## 2.4 Materiales y Equipos Utilizados en el Proyecto

Los materiales y equipos utilizados para la implementación de la plataforma Stewart-Gough son accesibles en su mayoría en el mercado, excepto por los actuadores lineales porque no son elaborados dentro del Ecuador. A continuación, se presentan de manera detallada cada uno de los materiales con sus respectivas características técnicas y se indica cómo han sido aplicados dentro de la implementación de la plataforma Stewart-Gough.

### 2.4.1 Actuadores Lineales

Los actuadores lineales son motores lineales Firgelli de la serie L16P de 100 mm de recorrido, con realimentación de potenciómetro lineal directamente desde el vástago. Estos motores tienen una velocidad máxima de 32 mm/s (sin carga) y una fuerza máxima de 30 N. En cuanto a sus características eléctricas, se recomienda una alimentación de

entre 0 y 15 VDC y tiene una corriente de bloqueo de 220 mA. Son los encargados de la transmisión de movimiento de la carga.

Figura 2.9. Actuador lineal de 100 mm (L16-P)



Actuador lineal con retroalimentación, (Actuonix, 2016)

Tabla 2.3. Funcionalidad de cada uno de los cables conectores del actuador lineal miniatura con retroalimentación

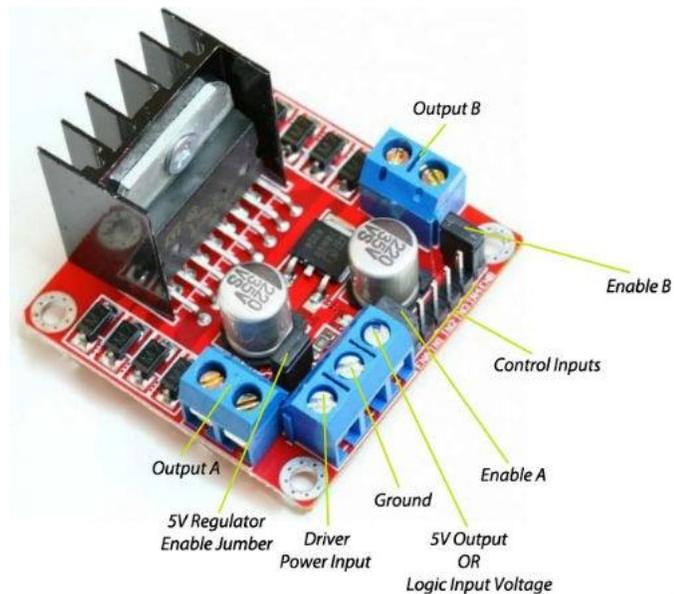
PINES DEL ACTUADOR LINEAL		
1	Naranja	pin negativo del sensor potenciómetro
2	Morado	señal del sensor potenciométrico
3	Rojo	Motor V+ (6V o 12V)
4	Negro	Motor V+ (tierra)
5	Amarillo	pin positivo del sensor potenciómetro

Tabla de descripción de pines del actuador lineal, Fuente: (Actuonix, 2016)

#### 2.4.2 Driver Motor L298N

El driver motor L298N permite controlar dos motores de corriente continua y motores paso a paso de no más de 2 A. Hay que tener presente el voltaje con el cual se alimenta este módulo, posee un regulador de tensión y es capaz de soportar tensiones de hasta 36V. El módulo cuenta con todos los componentes necesarios para funcionar sin necesidad de elementos adicionales, entre ellos diodos de protección y un regulador LM7805 que suministra 5V a la parte lógica del integrado L298N. Cuenta con jumpers de selección para habilitar cada una de las salidas del módulo (A y B, tal y como se muestra en la Figura 2.10), la salida A está conformada por OUT1 y OUT2 y la salida B por OUT3 y OUT4, los pines de habilitación son ENA y ENB respectivamente. (Electronilab, 2014)

Figura 2.10. Driver motor L298N

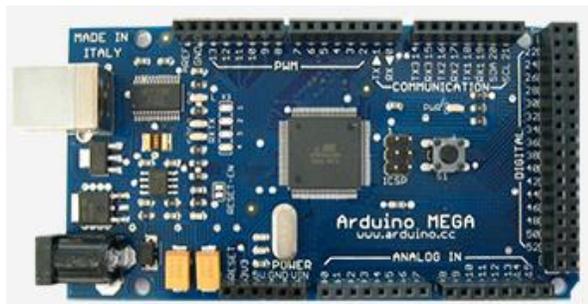


Módulo de control de motor para Arduino, (Electronilab, 2014)

### 2.4.3 Tarjeta Arduino Mega

El Arduino Mega es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega1280. Cuenta con 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 módulos UARTs (puertos serie RS-232), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio, ver en la Figura 2.11.

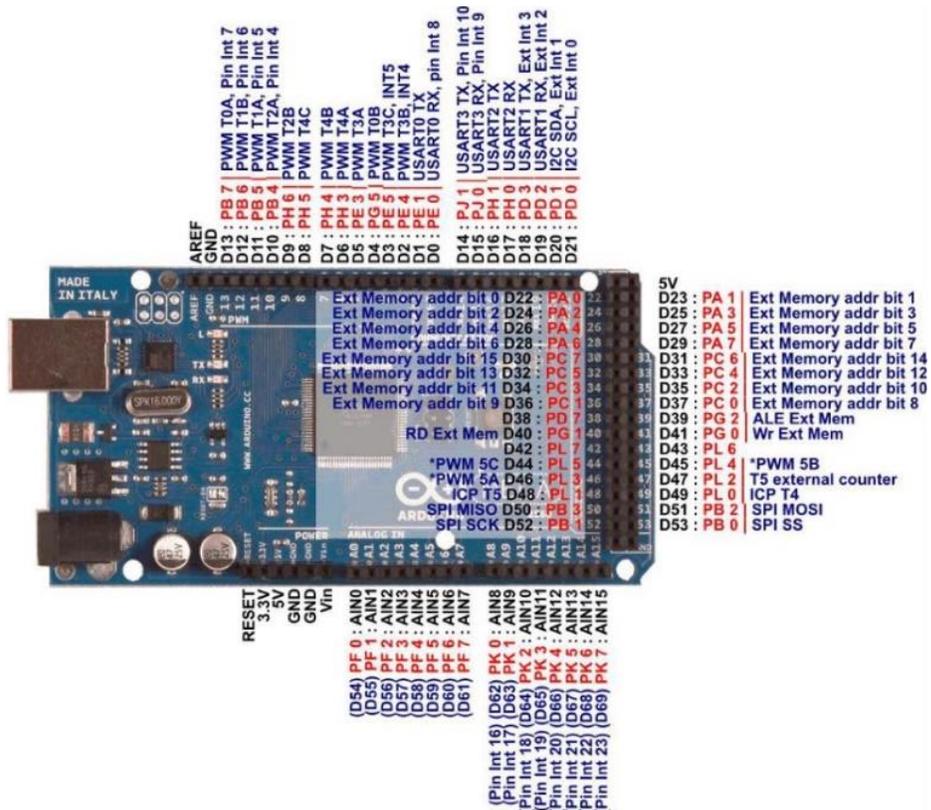
Figura 2.11. Tarjeta Arduino Mega



Placa electrónica de control, (Arduino, 2016).

Esta tarjeta contiene todos los elementos necesarios para apoyar al microcontrolador y para ponerla en funcionamiento debe ser conectado a un ordenador con un cable USB o a una batería con un adaptador de AC a DC, ver en la Figura 2.12.

Figura 2.12. Distribución de pines de la Tarjeta Arduino Mega 2650



Descripción grafica de las entradas y salidas disponibles, (Arduino, 2016)

### 2.4.4 Panel Fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en energía eléctrica, una partícula luminosa con energía (fotón) se convierte en una energía electromotriz (voltaica), de ahí su nombre, fotovoltaico, ver en la Figura 2.13. (García S. , 2013)

Figura 2.13. Panel solar monocristalino



Panel fotovoltaico circular de 5 V, (García S. , 2013)

En la tabla 2.4 se muestran las características técnicas del panel fotovoltaico utilizado para la implementación de la plataforma Stewart – Gough, el cual se encuentra disponible en el mercado.

Tabla 2.4. Datos eléctricos panel fotovoltaico.

<b>Especificaciones</b>	<b>Datos Electricos</b>
Alimentacion (max)	5 VDC
Corriente (max)	80 mA
Potencia (max)	0,4 W

Tabla de descripción técnica del panel fotovoltaico, (Robayo & Altamirano)

#### 2.4.5 Articulación Tipo Rótula

La articulación tipo rótula es un tipo de par cinemático que permite un relativo movimiento dentro de cierto ángulo en todos los planos que pasan por una línea. Una rótula tiene tres grados de libertad, aunque la amplitud del movimiento de dos de ellos esta limitada. (drabbe, 2016)

Figura 2.14. Rotula de dirección



Articulación tipo rotula, (Drabbe, 2016).

#### 2.4.6 Articulación Universal o Cardan

La articulación universal o cardan es utilizada para transmitir el movimiento entre dos árboles de ejes concurrentes; el ángulo entre los ejes puede variar durante el funcionamiento, pero no puede superar los  $40^\circ$ , ya que se rompería la junta. Fue inventada por Cardano conocido también por su nombre francés, Cardan, del que deriva la denominación de la junta. (MOTORGIGA, 2016).

Figura 2.15. Cojinetes de agujas Juntas universales



Articulación tipo universal o cardan, (Universal, 2016)

#### 2.5 Modelo Cinemático de la Plataforma Stewart-Gough

La cinemática y estática diferencial de la Plataforma Stewart Gough (SGP), se derivan y se analizan, con el fin de obtener una visión hacia lo que hará la estructura cinemática de la Plataforma Stewart Gough.

El análisis cinemático se utiliza para describir la relación entre el espacio de trabajo y el espacio articular de la Plataforma Stewart Gough (SGP), donde el espacio de trabajo corresponde a las coordenadas cartesianas de la punta de la herramienta de la plataforma y el espacio articular a las longitudes del actuador. La cinemática se puede formular tanto por análisis cinemático directo e inverso.

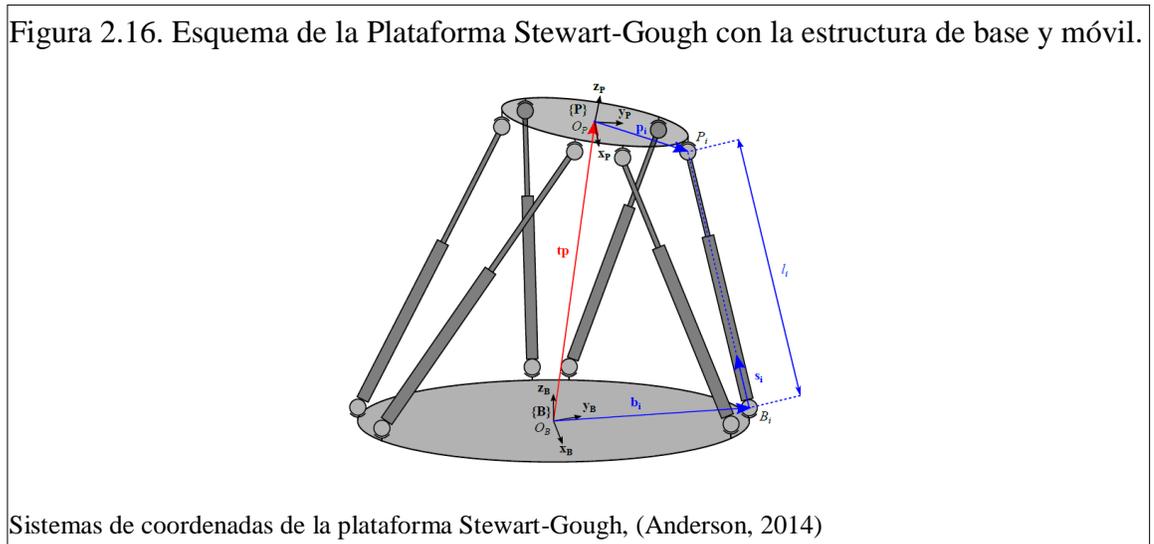
La cinemática directa describe la posición de la punta de la herramienta y la orientación en función de las longitudes del actuador y la cinemática inversa describe las longitudes del actuador en función de la posición y orientación de la punta de la herramienta. En contraste a los manipuladores serie, la cinemática inversa puede ser resuelta de una manera fácil y analítica para los manipuladores paralelos, mientras que la cinemática directa es un

problema bastante complejo que tiene que ser resuelto utilizando solucionadores numéricos.

El análisis cinemático se examina comúnmente a través de la cinemática diferencial. La cinemática diferencial tiene un papel muy importante en el estudio de los desplazamientos de la Plataforma Stewart Gough (SGP), porque conduce a la definición de la matriz jacobiana.

La matriz Jacobiana no sólo revela la relación entre las velocidades del espacio articular y el espacio de trabajo, sino también la precisión de la Plataforma Stewart Gough (SGP), la relación entre los torques y esfuerzos de la punta de la herramienta y los esfuerzos del actuador. Por tanto, para establecer las propiedades de la matriz Jacobiana se debe analizar y definir los conceptos de isotropía y destreza cinemática.

En la Figura 2.16 se muestra la Plataforma Stewart-Gough la cual consta de una base fija y una plataforma móvil conectada por seis patas.



La geometría se describe mediante dos sistemas de coordenadas que unen la base fija **B** y la plataforma móvil **P** respectivamente. El sistema de la base es también el sistema de coordenadas global y tiene su origen  $O_B$  en el centro del círculo base.

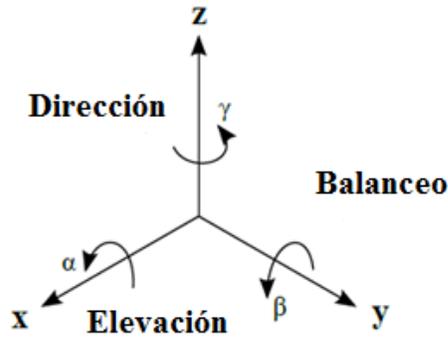
El sistema de coordenadas de la plataforma es móvil y a menudo es referido como la punta de la herramienta, ya que la orientación y posición de esta punta es la que se desea controlar. El origen  $O_p$  del sistema de la plataforma es el lugar en el centro del círculo de la plataforma.

Las articulaciones pasivas, que conectan los actuadores lineales con la base y la plataforma, son los puntos de  $B_i$  y  $P_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ . Los puntos  $B_i$  se ubican en la base fija y los  $P_i$  en la base móvil de la plataforma. Las posiciones de las articulaciones pasivas son descritas usando los vectores  $\mathbf{b}_i$  y  $\mathbf{p}_i$ . Las longitudes de los actuadores lineales se denotan con  $l_i$  y su dirección con el vector unidad  $\mathbf{s}_i$ .

La posición y orientación de la punta de la herramienta se describe usando la posición del vector  ${}^B\mathbf{tp}$  y la matriz de rotación  ${}^B\mathbf{R}_p$ . El exponente principal ha de leerse como el *vector  $\mathbf{tp}$  en el sistema  $\{\mathbf{B}\}$* . La matriz de rotación  ${}^B\mathbf{R}_p$  describe como el sistema  $\{\mathbf{P}\}$  gira en relación al sistema  $\{\mathbf{B}\}$ . La matriz de rotación es un método conveniente para describir la orientación de un cuerpo rígido, tal como la plataforma.

Uniéndolo a un sistema móvil a la plataforma, la matriz de rotación se utiliza para describir los tres vectores unitarios del sistema, es decir  $\mathbf{x}_p$ ,  $\mathbf{y}_p$  y  $\mathbf{z}_p$ , según se muestra en la Figura 2.16. Esta rotación puede representarse de varias maneras, una de ellas por ángulos de elevación, balanceo y dirección ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). Para la representación de los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , cada uno de los ángulos definen las rotaciones a lo largo del eje X, eje Y y el eje Z, como se ilustra en la Figura 2.17.

Figura 2.17. Ángulos de navegación: elevación, balanceo y dirección.



Ángulos de rotación, (Anderson, 2014)

La matriz de rotación de elevación - balanceo - dirección está dada en la ecuación 1.

$$R_{PRY}(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\gamma) R_y(\beta) R_x(\alpha)$$

$$R_{PRY}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde  $c\alpha$  es la abreviatura para  $\cos(\alpha)$ ,  $s\alpha$  para  $\sin(\alpha)$  y etc. Para el análisis de la cinemática inversa se asume que la posición  ${}^B\mathbf{tp}$  y la orientación  ${}^B\mathbf{R}_P$  de la plataforma están dados y el problema es la obtención de las longitudes de las patas  $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]$ . A partir de la geometría de la Plataforma Stewart Gough (SGP) ilustrada en la Figura 2.16 la relación cinemática en lazo cerrado para cada pata,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , está expresada como:

$$\begin{aligned} l_i {}^B\mathbf{s}_i &= {}^B\mathbf{tp} + {}^P\mathbf{p}_i - {}^B\mathbf{b}_i \\ &= {}^B\mathbf{tp} + {}^B\mathbf{R}_P {}^P\mathbf{p}_i - {}^B\mathbf{b}_i \end{aligned} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Como el vector  $l_i {}^B\mathbf{s}_i$  describe el vector de la  $i$ -ésima pata, la longitud de la  $i$ -ésima pata es determinada a partir de la norma Euclidiana. La longitud de cada pata es por lo tanto obtenida por:

$$l_i = \left[ ({}^B\mathbf{tp} + {}^B\mathbf{R}_P {}^P\mathbf{p}_i - {}^B\mathbf{b}_i)^T ({}^B\mathbf{tp} + {}^B\mathbf{R}_P {}^P\mathbf{p}_i - {}^B\mathbf{b}_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde el superíndice T denota la transpuesta del vector o matriz. Para la ecuación 3 existe una única solución de las longitudes de las patas a partir, de una posición y orientación dada de la punta de la herramienta.

### 2.5.1 Cinemática Diferencial – Jacobiana

El análisis de la cinemática diferencial tiene un rol crucial en el estudio de los manipuladores paralelo. El mapeo de las velocidades lineal y angular de la plataforma para la obtención de las velocidades de las articulaciones accionadas, es realizada usando la matriz Jacobiana (de ahora en adelante Jacobiana).

Por otra parte, revelando la relación entre las velocidades, la Jacobiana es también usada para asignar los torques y fuerzas de la punta de la herramienta a las fuerzas del actuador. Además, las propiedades de la Jacobiana son comúnmente usadas en el análisis de singularidad cinemática, las fuerzas estáticas y la exactitud.

#### La Jacobiana para la Plataforma Stewart Gough (SGP)

Las ecuaciones de la cinemática diferencial para la Plataforma Stewart Gough (SGP) son obtenidas por la diferenciación de la ecuación 2 con respecto al tiempo:

$$\dot{l}_i^B \mathbf{s}_i + l_i^B \dot{\mathbf{s}}_i = {}^B \mathbf{v}_p + {}^B \dot{\mathbf{R}}_p {}^P \mathbf{p}_i + {}^B R_p {}^P \dot{\mathbf{p}}_i - {}^B \dot{\mathbf{b}}_i \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde  ${}^B \mathbf{v}_p$  es la velocidad lineal de la punta de la herramienta  $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$  descrita en el sistema base, es decir,  ${}^B \dot{\mathbf{t}}_p$ . La derivada con respecto al tiempo de  ${}^B \mathbf{b}_i$  y  ${}^P \mathbf{p}_i$  son cero, ya que son vectores de posición constante cuando son expresados en sus respectivos sistemas. La relación entre la velocidad de la matriz de rotación y la velocidad angular en un sistema fijo está dada por:

$${}^B \boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} = {}^B \dot{\mathbf{R}}_p {}^B \mathbf{R}_p^T \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde  ${}^B \boldsymbol{\Omega}$  es una matriz anti simétrica que contiene las velocidades angulares. Usando esta relación, el término  ${}^B \dot{\mathbf{R}}_p {}^P \mathbf{p}_i$  se reescribe como:

$$\begin{aligned} {}^B \dot{\mathbf{R}}_P {}^P \mathbf{p}_i &= {}^B \dot{\mathbf{R}}_P {}^B \mathbf{R}_P^T {}^B \mathbf{R}_P {}^P \mathbf{p}_i = {}^B \boldsymbol{\Omega} {}^B \mathbf{R}_P {}^P \mathbf{p}_i \\ {}^B \boldsymbol{\omega} \times ({}^B \mathbf{R}_P {}^P \mathbf{p}_i) &= {}^B \boldsymbol{\omega} \times {}^B \mathbf{p}_i \end{aligned} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde  ${}^B \boldsymbol{\omega}$  es un vector con la velocidad angular de la punta de la herramienta  $[\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z]^T$  descrito en el sistema base. La ecuación cinemática diferencial es por lo tanto reducida a:

$$\dot{l}_i {}^B \mathbf{s}_i + l_i {}^B \dot{\mathbf{s}}_i = {}^B \mathbf{v}_p + {}^B \boldsymbol{\omega} \times {}^B \mathbf{p}_i \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación con el vector unitario  ${}^B \mathbf{s}_i$  (teniendo en cuenta que  $\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_i = 1$  y  $\mathbf{s}_i \cdot \dot{\mathbf{s}}_i = 0$ ), y usando la regla de intercambio entre la multiplicación punto y cruz, la expresión final de la ecuación diferencial cinemática se expresa como:

$$\dot{l}_i {}^B \mathbf{s}_i^T {}^B \mathbf{s}_i + l_i {}^B \mathbf{s}_i^T {}^B \dot{\mathbf{s}}_i = {}^B \mathbf{s}_i^T {}^B \mathbf{v}_p + {}^B \mathbf{s}_i^T ({}^B \boldsymbol{\omega} \times {}^B \mathbf{p}_i) \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$\dot{l}_i = \mathbf{s}_i^T \mathbf{v}_p + (\mathbf{p}_i \times \mathbf{s}_i)^T \boldsymbol{\omega} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde  $\dot{l}_i$  es la velocidad del  $i$  – ésimo actuador,  $\mathbf{v}_p$  y  $\boldsymbol{\omega}$  corresponde a la velocidad lineal y angular de la punta de la herramienta respectivamente. El superíndice B es omitido para todos los vectores para simplificar la expresión, ya que todos los vectores son descritos en el sistema base. Reordenando la de expresión en forma matricial, se obtiene la Jacobiana de la Plataforma Stewart Gough (SGP). (Anderson, 2014)

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad \Leftrightarrow \quad \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{l}} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Donde  $\dot{\mathbf{l}}$  es el vector velocidad del actuador,  $\mathbf{J}$  es la Jacobiana y  $\dot{\mathbf{q}}$  es el vector velocidad de la punta de la herramienta:

$$\dot{\mathbf{l}} = \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \\ \dot{l}_4 \\ \dot{l}_5 \\ \dot{l}_6 \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1^T & (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{s}_1)^T \\ \mathbf{s}_2^T & (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{s}_2)^T \\ \mathbf{s}_3^T & (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{s}_3)^T \\ \mathbf{s}_4^T & (\mathbf{p}_4 \times \mathbf{s}_4)^T \\ \mathbf{s}_5^T & (\mathbf{p}_5 \times \mathbf{s}_5)^T \\ \mathbf{s}_6^T & (\mathbf{p}_6 \times \mathbf{s}_6)^T \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.11)}$$

A partir de la expresión anterior se ve que la Jacobiana es una matriz cuadrada de 6x6 y una función de la posición y orientación de la plataforma ( $\mathbf{q} = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$ ).

También hay que señalar que las tres primeras columnas de Jacobiana están relacionados con el movimiento de traslación y las tres últimas columnas están relacionadas con la rotación de la Plataforma Stewart Gough (SGP). Además, multiplicando ambos lados de la ecuación 10 por la derivada con respecto al tiempo ( $dt$ ), se obtiene la siguiente relación:

$$dt \dot{l} = J dt \dot{q} \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$dl = J dq \leftrightarrow dq = J^{-1}dl \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Así la Jacobiana también describe la exactitud del robot, es decir, un pequeño cambio en el desplazamiento de los actuadores se traduce en un cambio en la posición de la punta de la herramienta.

### **2.5.2 Optimización Cinemática de la Plataforma Stewart Gough (SGP)**

Para la formulación de un problema de optimización se pueden mejorar los índices de desempeño cinemático; las variables de diseño apropiadas tienen que ser seleccionadas para el diseño de la Plataforma Stewart Gough (SGP).

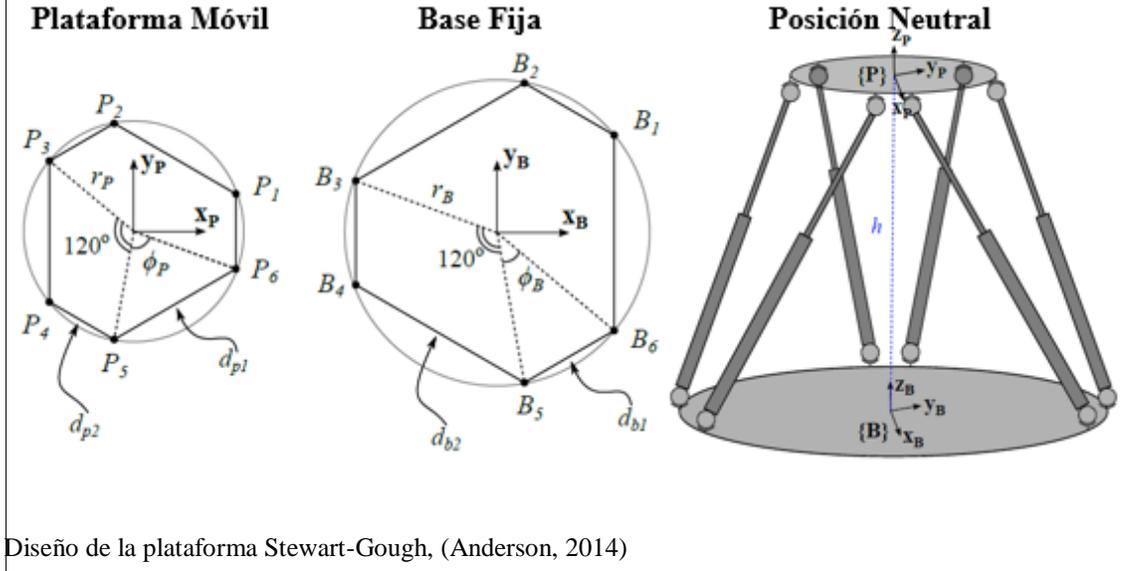
Las variables del diseño pueden ser consideradas como variables libres que pueden ser asignadas a un valor dentro de un rango específico. El rango está formulado como restricciones de un problema de optimización. El número de variables diseñadas especifican los grados de libertad para el problema de optimización.

Cuanto más grados de libertad tiene un problema, el problema de la optimización se vuelve más complejo. Así, el número de variables de diseño debería mantenerse tan bajo como sea posible.

### **Diseño del Espacio Geométrico de la Plataforma Stewart Gough (SGP)**

El diseño de la Plataforma Stewart Gough (SGP) es limitada a ser de 6 grados de libertad (GDL) con una base plana, una base móvil y con las articulaciones pasivas colocadas en una sola trayectoria circular como se ilustra en la Figura 2.18.

Figura 2.18. Esquemas de la plataforma de la Plataforma Stewart Gough (SGP): Base móvil, base fija y posición neutral.



Los radios de las trayectorias circulares de la base y la plataforma son denotados como  $r_B$  y  $r_P$  respectivamente. Además, se elige tener un espacio angular entre las articulaciones pasivas, tal que ambos la base y plataforma forman hexágonos semiregulares.

Este diseño simétrico asegura que la carga útil sea distribuida igualmente sobre los actuadores. Los ángulos de separación entre un conjunto de articulaciones pasivas (B1-B2, B3-B4 y B5-B6) en la base y la plataforma son denotadas por  $\phi_B$  y  $\phi_P$ .

Los vectores posición de las articulaciones pasivas en la base  $\mathbf{b}_i$  y en la plataforma  $\mathbf{p}_i$  pueden ser expresados de este modo en términos de sus radios:

$${}^B \mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} r_B \cdot \cos(\varphi_{B,i}) \\ r_B \cdot \sin(\varphi_{B,i}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^P \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} r_P \cdot \cos(\varphi_{P,i}) \\ r_P \cdot \sin(\varphi_{P,i}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.14)}$$

Donde el superíndice principal indica al sistema de referencia que ellos describen. Los ángulos  $\varphi_{B,i}$  y  $\varphi_{P,i}$  pueden ser expresados por los ángulos de separación como:

$$\varphi_{B,i} = \frac{i\pi}{3} - \frac{\phi_B}{2} \quad \varphi_{P,i} = \frac{i\pi}{3} - \frac{\phi_P}{2} \quad \text{para } i = 1,3,5 \quad \text{Ec. (2.15)}$$

$$\varphi_{B,i} = \varphi_{B,i-1} + \phi_B \quad \varphi_{P,i} = \varphi_{P,i-1} + \phi_P \quad \text{para } i = 2,4,6 \quad \text{Ec. (2.16)}$$

La altura  $h$  de la Plataforma Stewart Gough (SGP) describe la distancia desde el origen de referencia del sistema base al origen de referencia del sistema de la plataforma móvil (punta de la herramienta). La posición neutral está definida como la posición de la Plataforma Stewart Gough (SGP) cuando esta se localiza en el punto centro del espacio de trabajo, es decir,  $(x, y, z) = (0,0, h)$ .

Las variables de diseño para el problema de optimización pueden ser así resumido como:

$$\mathbf{x} = [r_B \quad r_P \quad \phi_B \quad \phi_P \quad h] \quad \text{Ec. (2.17)}$$

El algoritmo de optimización solo puede buscar para diseños en el dominio factible y así las variables de diseño  $\mathbf{x}$  son sujetas a restricciones. Estas restricciones modelan las limitaciones físicas para el diseño.

Algunas de las restricciones son formuladas como limitación directa de las variables de diseño, mientras otras son dadas en una forma indirecta. El máximo espacio de piso que la Plataforma Stewart Gough (SGP) puede ocupar es de 1.5 x 1.5 m, lo cual se debe al máximo radio de la base fija y al radio de la base móvil que es de 0.75 m. El radio mínimo de la plataforma es fijado como 0.25 m para asegurar un espacio adecuado para opciones de montaje. No hay requerimientos para el radio mínimo de la base fija, para simplificar el análisis el radio mínimo de 0.25m también se eligió para la base.

Los ángulos de espaciado  $\phi_B$  y  $\phi_P$  son ambos limitados para estar en el rango  $0^\circ$  a  $120^\circ$  a fin de evitar un cruce de patas. La altura  $h$  no tiene restricciones directas, pero está indirectamente limitada por la longitud de las patas.

### 2.5.3 Restricciones de las Junturas Pasivas

Se requiere que dos patas no compartan la misma articulación pasiva. En este caso los ángulos  $\phi_B$  y  $\phi_P$  son iguales a  $0$  o  $120^\circ$ , si dos articulaciones pasivas comparten el mismo punto se viola el requerimiento. Sin embargo, una restricción esta formulado para la distancia mínima entre dos juntas pasivas  $d_{min}$ . Porque de la simetría de la base fija y

la plataforma móvil de la Plataforma Stewart Gough (SGP) solo existen dos distancias diferentes entre dos articulaciones adyacentes, ver Figura 2.18.

Para la base fija, las dos distancias  $d_{base1}$  y  $d_{base2}$  pueden ser expresadas por el radio de la base y el ángulo de separación mediante la ley del coseno como:

$$d_{b1}^2 = r_B^2 + r_B^2 - 2r_B r_B \cos(\phi_B) \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$d_{b1} = \sqrt{2r_B^2 - 2r_B r_B \cos(\phi_B)} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

$$d_{b2} = \sqrt{2r_B^2 - 2r_B r_B \cos(120^\circ - \phi_B)} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Para tener espacio suficiente para las articulaciones pasivas una distancia mínima  $d_{min} = 0.15$  m es requerida. Esto deja un espacio para una articulación pasiva de radio de 75mm, que se asume es suficiente. La restricción de la articulación pasiva para la base puede ser expresada como:

$$d_{b1} \geq 0.15m \quad \text{Ec. (2.21)}$$

$$0.15m - d_{b1} \leq 0 \quad \text{Ec. (2.22)}$$

$$0.15m - d_{b2} \leq 0 \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Restricciones similares son formuladas para la plataforma móvil:

$$0.15m - d_{p1} \leq 0 \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$0.15m - d_{p2} \leq 0 \quad \text{Ec. (2.25)}$$

Donde  $d_{p1}$  y  $d_{p2}$  son las distancias entre dos articulaciones adyacentes en la plataforma móvil:

$$d_{p1} = \sqrt{2r_P^2 - 2r_P r_P \cos(\phi_P)} \quad \text{Ec. (2.26)}$$

$$d_{p2} = \sqrt{2r_P^2 - 2r_P r_P \cos(120^\circ - \phi_P)} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

#### 2.5.4 Restricciones de los Actuadores Lineales

Para que el diseño de la Plataforma Stewart Gough (SGP) sea factible, los actuadores tienen que ser lineales. Sin embargo, las limitaciones se someten a las longitudes de las

patas de la Plataforma Stewart Gough (SGP). La Figura 2.19 muestra un bosquejo de un actuador lineal que es completamente desplegable, así se tiene una distancia mínima de  $L_{\min}$ .

La longitud de carrera  $L_{carrera}$  es la longitud del movimiento lineal que el cilindro puede realizar. La longitud de carrera no puede ser más grande que la longitud mínima del cilindro y es efectivamente más pequeña que la longitud mínima, debido a la estructura del cilindro y que incluye una celda de carga. Se asume que 300mm representa el espacio adicional necesario. La relación entre la longitud de carrera y la longitud mínima de la pata está dada por:

$$L_{carrera,i} = L_{\min,i} - 0.3m \quad \text{for } i = 1,2, \dots,6. \quad \text{Ec. (2.28)}$$

Donde el índice  $i$  indica el número de patas. Los fabricantes de los actuadores lineales a menudo tienen un número limitado de posibles diámetros de pistones y vástagos, pero la longitud de carrera es variable. Sin embargo, cuanto mayor sea la longitud de carrera del actuador lineal más sensible e inestable se vuelve el recorrido y un diámetro más grande de la barrera será requerido.

Se asume que una longitud de carrera máxima de 100 mm no dará lugar a problemas de pandeo. Usando la relación de la ecuación 28, la longitud mínima de las patas de la Plataforma Stewart Gough (SGP) puede ser expresada como:

$$L_{carrera,i} - 0.8 m \leq 0 \quad \text{Ec. (2.29)}$$

$$L_{carrera,i} - 1.1m \leq 0 \quad \text{para } i = 1,2, \dots,6. \quad \text{Ec. (2.30)}$$

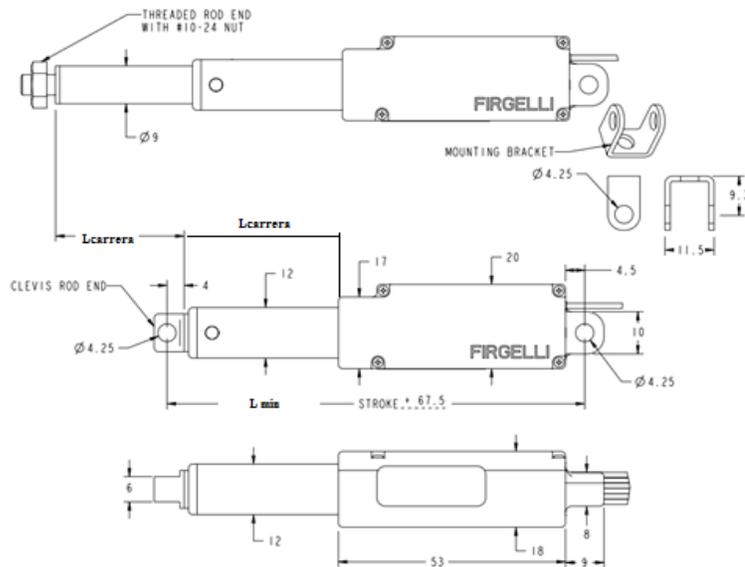
La longitud del actuador lineal cuando es extendido completamente, es la suma de la longitud mínima y la longitud de carrera. La máxima longitud de la pata de la Plataforma Stewart Gough (SGP) es por tanto una restricción dada por:

$$L_{\max,i} \leq L_{\min,i} + L_{carrera,i} \quad \text{Ec. (2.31)}$$

$$L_{\max,i} \leq L_{\min,i} + L_{\min,i} - 0.3 m \quad \text{Ec. (2.32)}$$

$$L_{\max,i} - 2 L_{\min,i} + 0.3 m \leq 0 \quad \text{para } i = 1,2, \dots,6 \quad \text{Ec. (2.33)}$$

Figura 2.19. Bosquejo del actuador lineal Firgelli tipo P.



Longitud del actuador lineal, (Actuonix, 2016)

### 2.5.5 Espacio de Trabajo de la Plataforma Stewart Gough (SGP)

La Plataforma Stewart Gough (SGP) está destinada a tener una aplicación versátil, es decir su tarea específica no está definida. En base a esta se consideración se debe definir un espacio de trabajo para la Plataforma Stewart Gough (SGP). (Anderson, 2014)

El espacio de trabajo de la Plataforma Stewart Gough (SGP) ( $w$ ) puede ser formulado como un espacio de trabajo cartesiano  $(x, y, z)$  y un espacio de trabajo Euclidiano  $(\alpha, \beta, \gamma)$  de la punta de la herramienta. El espacio de trabajo cartesiano es el espacio de trabajo regular en forma de caja cuadrada con lados de 0.3m.

El centro del espacio de trabajo cartesiano está en la posición neutral de la punta de la herramienta  $(0, 0, h)$ . (Anderson, 2014)

El espacio de trabajo cartesiano puede ser expresado en el sistema de referencia global  $\{B\}$  como:

$$x \in (-0.15, 0.15) \text{ m} \quad \text{Ec. (2.34)}$$

$$y \in (-0.15, 0.15) \text{ m} \quad \text{Ec. (2.35)}$$

$$z \in (-0.15 + h, 0.15 + h) \text{ m} \quad \text{Ec. (2.36)}$$

La plataforma Stewart-Gough tiene que ser capaz de inclinar la plataforma móvil  $\pm 15^\circ$  en todo el espacio de trabajo. El espacio de trabajo Euclidiano por lo tanto puede ser expresado como:

$$\alpha \in (-15,15)^\circ \quad \text{Ec. (2.37)}$$

$$\beta \in (-15,15)^\circ \quad \text{Ec. (2.38)}$$

$$\gamma \in (-15,15)^\circ \quad \text{Ec. (2.39)}$$

Los indicadores de rendimiento cinemático son evaluados numéricamente, porque el espacio de trabajo ( $w$ ) debe ser descrito en un número finito de puntos ( $N_{total}$ ) representando las posturas de la Plataforma Stewart Gough (SGP). La discretización se logra mediante dos números  $n_{CW}$  y  $n_{EW}$ , donde  $n_{CW}$  es el número de divisiones de  $x, y$  and  $z$  en el espacio cartesiano y  $n_{EW}$  es el número de divisiones de  $\alpha, \beta$  and  $\gamma$  en el espacio Euclidiano. La discretización total puede ser calculada de este modo:

$$N_{total} = n_{CW}^3 n_{EW}^3 \quad \text{Ec. (2.40)}$$

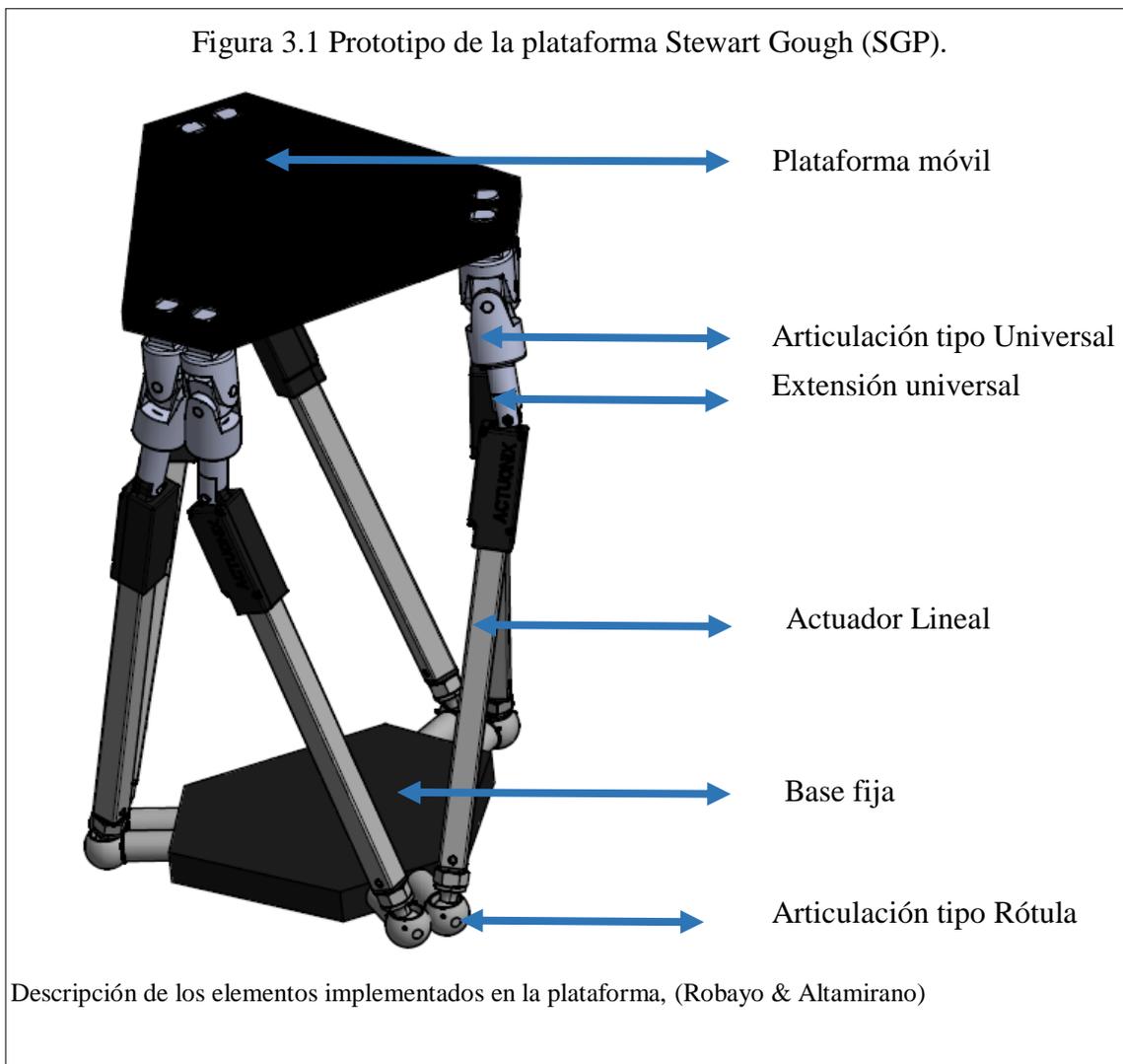
La precisión de índices de funcionamiento cinético es mejorada por el aumento de  $n_{CW}$  y  $n_{EW}$ . Así, la discretización total  $n_{total}$ , es una compensación entre el tiempo de proceso y la precisión. Para encontrar un número suficiente de puntos  $n_{total}$ , el GCI es calculado para los valores diferentes de  $n_{CW}$  y  $n_{EW}$  para un juego dado de variables de diseño. (Anderson, 2014)

### CAPITULO 3

#### DISEÑO MECÁNICO, ELÉCTRICO- ELECTRÓNICO

Este capítulo trata de la implementación mecánica, eléctrico-electrónico de la plataforma Stewart Gough (SGP); además del dimensionamiento de la base fija, la plataforma móvil, panel fotovoltaico, el funcionamiento del hardware y software.

En la Figura 3.1 se puede observar que la estructura está compuesta por tres grupos: los actuadores lineales, la base fija y la base móvil.



### 3.1 Implementación Mecánica de la Plataforma Stewart Gough (SGP)

En esta sección se dimensionan a los actuadores lineales como patas para la plataforma Stewart Gough (SGP). Las seis patas (actuadores lineales) están idénticamente diseñadas, para soportar el peso requerido para elevar a la plataforma móvil y a los paneles fotovoltaicos, véase la Figura 3.2.

Figura 3.2. Modelo-CAD de un actuador lineal



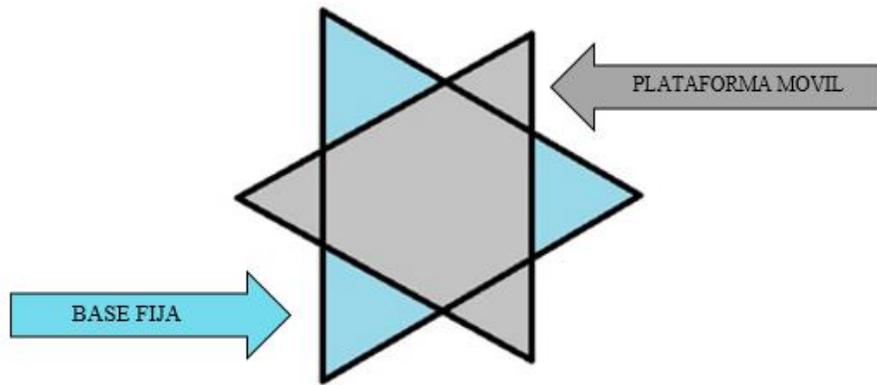
Actuador lineal 3D, (Robayo & Altamirano)

Como se indica en el Capítulo I, la plataforma Stewart Gough (SGP) debe tener dos grados de libertad de rotación en la base (articulación universal) y tres en la plataforma móvil (articulación esférica). Estos grados de libertad se consiguen mediante una combinación de las articulaciones pasivas y el actuador lineal. Las dos articulaciones pasivas son idénticas y permiten un grado de libertad al rotar en cada una.

#### 3.1.1 Implementación de las Base Fija y de la Plataforma Móvil Stewart – Gough

Se eligió implementar una plataforma Stewart Gough como la mostrada en la Figura 3.3, debido a las características físicas de los actuadores lineales seleccionados para este sistema, así también la forma triangular y tamaño de la base fija y la plataforma móvil. La base fija tiene un grosor mayor al de la base móvil porque deberá soportar el peso de la plataforma móvil y los actuadores, dentro de la implementación su ubicación será opuesta una de la otra (180°). Es decir, desde la vista superior del sistema se podrá observar los vértices de cada triángulo coincidiendo ambos de manera opuesta.

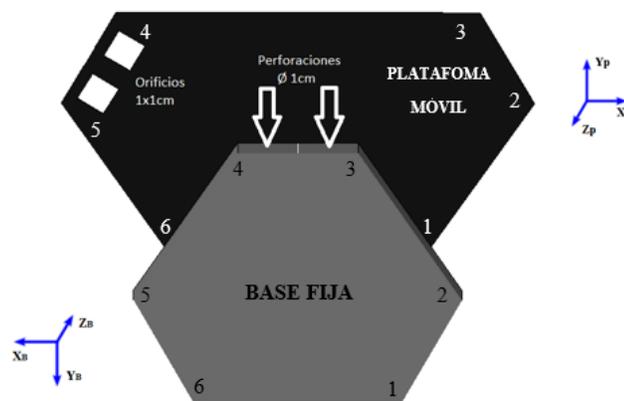
Figura 3.3. Forma y configuración de las bases del robot



Geometría triangular de la base fija y la plataforma móvil, (Robayo & Altamirano)

El diseño final fue modificado para facilitar la instalación de los actuadores, recortando las esquinas de cada triángulo y obteniendo como resultado cada una de las estructuras en un polígono hexagonal. El polígono gris corresponde a la base fija y el polígono negro corresponde a la plataforma móvil, en la que se hicieron dos orificios de 1x1 cm para el anclaje de las articulaciones universales.

Figura 3.4. Ubicación gráfica para la colocación de las articulaciones. (Vista Inferior)



Diseño de la base fija y la plataforma móvil, (Robayo & Altamirano)

A continuación en las tablas 3.1 y 3.2, se detallan los valores tomados de cada una de las coordenadas de la base fija y la plataforma móvil respectivamente.

En la Tabla 3.3, se define el valor de la altura entre la base fija que indica la posición inicial de la plataforma desde donde los movimientos se ejecutaran con respecto a la plataforma móvil. En la Figura 3.4, se observa como fue distribuido el orden numérico según las coordenadas cartesianas definidas para cada uno de los actuadores lineales tomando el sistema de referencia de la base fija y la plataforma móvil.

Tabla 3.1. Coordenadas de la ubicación de los actuadores lineales tomando el sistema de referencia de la plataforma móvil.

<b>COORDENADAS SUPERIORES DESDE LA PLATAFORMA MOVIL [cm]</b>						
<b>MOTOR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>COORD. X</b>	8	9	0,6	-0,6	-9	-8
<b>COORD. Y</b>	6	4,6	-7	-7	4,6	6

Coordenadas cartesianas medidas en la plataforma móvil, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Tabla 3.2. Coordenadas de la ubicación de los actuadores lineales tomando el sistema de referencia de la base fija.

<b>COORDENADAS SUPERIORES DESDE LA BASE FIJA [cm]</b>						
<b>MOTOR</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>COORD. X</b>	1,4	9,8	8,4	-8,4	-9,8	-1,4
<b>COORD. Y</b>	9	-2,5	-4,5	-4,5	-2,5	9

Coordenadas cartesianas medidas en la base fija, Fuentes: (Robayo & Altamirano)

Tabla 3.3. Datos medidos entre los extremos de la plataforma Stewart-Gough.

<b>DATOS EXTRAS [cm]</b>	
Altura desde la base fija a la plataforma móvil en posición de mínima altura	27
Longitud máxima completa	37

Tabla de datos de altura y longitud máxima, Fuentes: (Robayo & Altamirano)

### 3.1.2 Base Fija de la Plataforma Stewart Gough

El material usado para la base fija de la plataforma Stewart Gough es de madera y posee un espesor de 3 cm debido a los agujeros que se requieren para ensamblar las articulaciones tipo rótula en los lados resultantes de los cortes del triángulo de la base fija. Se realizaron dos agujeros en los lados antes mencionados con una distancia de 1,5 cm entre ambos. En la Figura 3.5 se detalla los acoples que unen al actuador lineal con la base fija de la plataforma Stewart Gough.

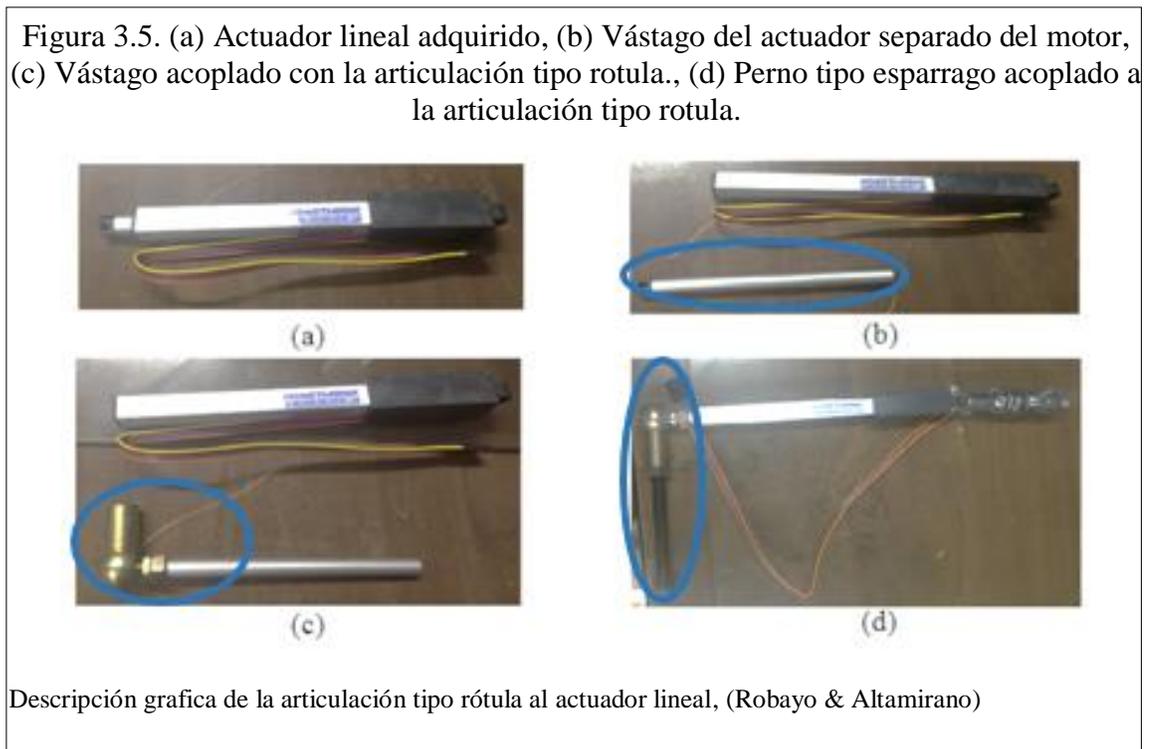
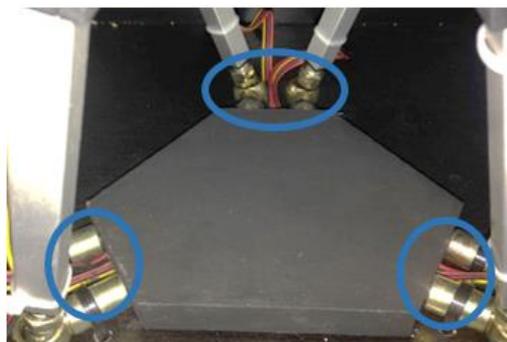


Figura 3.6. Implementación de base fija y acople de articulación tipo rótula.

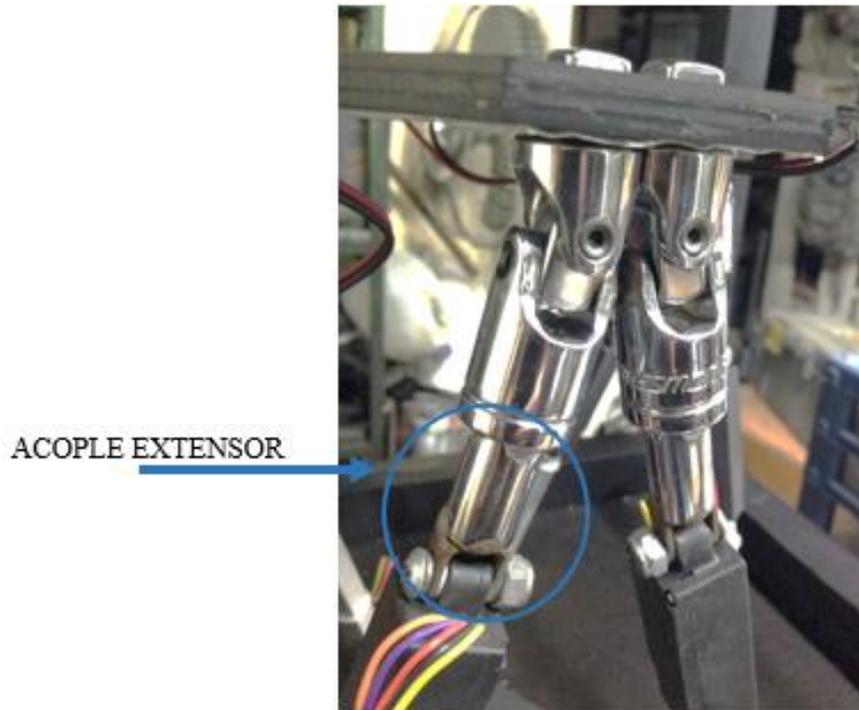


Actuadores lineales acoplados a la base fija, (Robayo & Altamirano)

### 3.1.3 Plataforma Móvil de la Plataforma Stewart Gough

Está compuesta de tres láminas de acrílico color negro de un espesor de 0,8 cm cada una, dando un total de 2,4 cm a la base móvil. Además, posee dos agujeros cuadrados de 1 cm cada uno con una separación de 0,5 cm que permitirá acoplar las articulaciones tipo universal.

Figura 3.7. Implementación del acople extensor



Ubicación del acople extensor en la plataforma Stewart-Gough, (Robayo & Altamirano)

Se adaptó un acople extensor de 1/4 a la articulación tipo universal al actuador lineal, y mediante la soldadura de una viñeta tipo U al acople extensor para finalmente atornillarla a la parte posterior del actuador lineal.

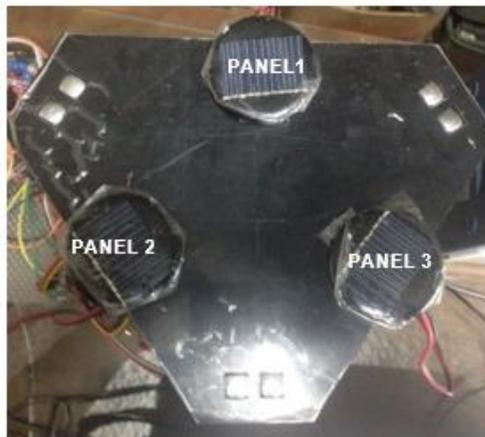
## 3.2 Dimensionamiento de los Paneles Fotovoltaicos usados como Sensores

Los paneles fotovoltaicos funcionan principalmente para la recolección y generación de electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. Por las características mostradas en la Tabla 2.4, se puede concluir que al colocar los tres paneles fotovoltaicos en la plataforma móvil de la plataforma Stewart Gough no es necesario implementar ningún

tipo de acondicionamiento de señal debido a las características propias del panel fotovoltaico.

Con los voltajes proporcionados por los tres sensores (paneles fotovoltaicos), se ingresó estas señales al convertor analógico digital (A/D) de la tarjeta Arduino para ser utilizadas en el algoritmo de programación en el software Matlab.

Figura 3.8. Paneles fotovoltaicos implementados en la base móvil como sensores.



Ubicación de los paneles fotovoltaicos en la plataforma Stewart-Gough, (Robayo & Altamirano)

Figura 3.9. Conexiones de los paneles fotovoltaicos

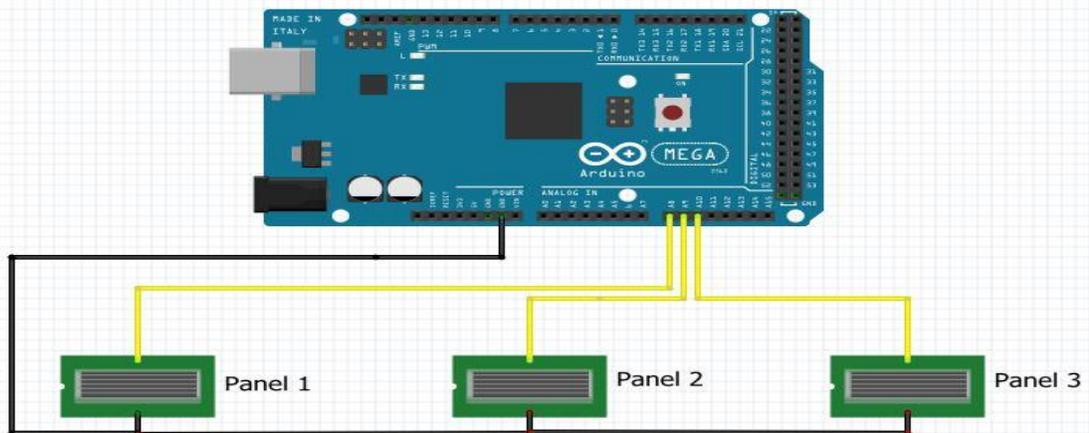
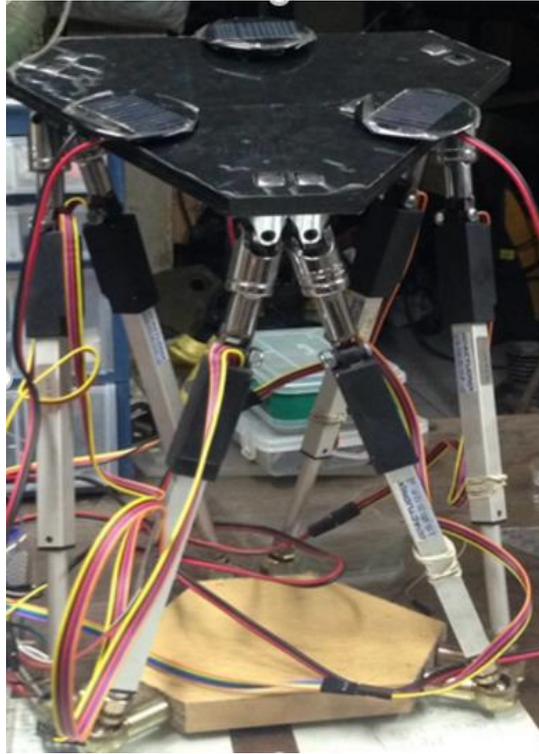


Diagrama de la ubicación de los paneles fotovoltaicos en la tarjeta Arduino, (Robayo & Altamirano)

Figura 3.10. Implementación mecánica real de la plataforma Stewart-Gough



Implementación final SGP, (Robayo & Altamirano)

### 3.3 Implementación Electrónica del Circuito de Control de los Actuadores

Los actuadores lineales interiormente constan de un motor de 12 VDC además de un potenciómetro (sensor) que proporciona un voltaje de salida de 0 a 5 VDC dependiendo de la carrera del actuador lineal, en este caso la carrera total del actuador lineal es de 10 cm. A través de este voltaje es posible conocer las diferentes distancias de los actuadores lineales al extenderse de la base fija.

Con el voltaje proporcionado por el sensor de cada actuador lineal se ingresaron estas señales al conversor analógico digital (A/D) de la tarjeta Arduino digitalizando estas entradas y ensamblándolas en el algoritmo de programación del software Matlab.

En la tarjeta Arduino Mega 2650 se conectaron los Drivers Motors (Puentes H L298N) para el control de los actuadores de la siguiente manera:

Tabla 3.4. Configuración de pines de conexión en la placa de control para los actuadores lineales.

Puente H (L298N)	Motor	Pines de conexión (Salidas)	Enables
1	1	2	8
		3	
	2	4	9
2	3	22	10
		24	
	4	26	11
3	5	23	12
		25	
	6	27	13
		29	

Distribución de pines para la placa de control, Fuente: (Robayo & Altamirano).

Usando el software Fritzing se diseñó las conexiones desde los pines de salida de la tarjeta Arduino hacia los actuadores lineales.

Figura 3.11. Bloque de conexión de la placa de control de los actuadores lineales.

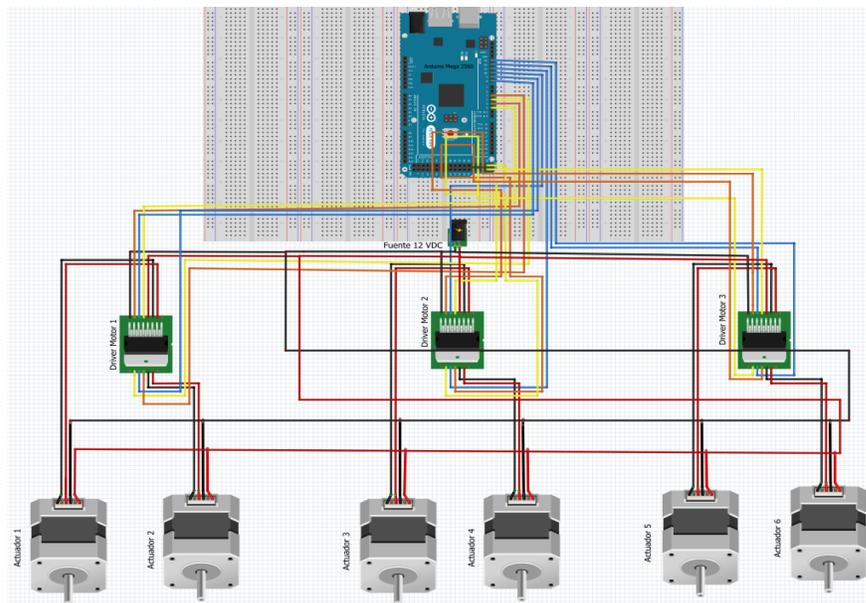
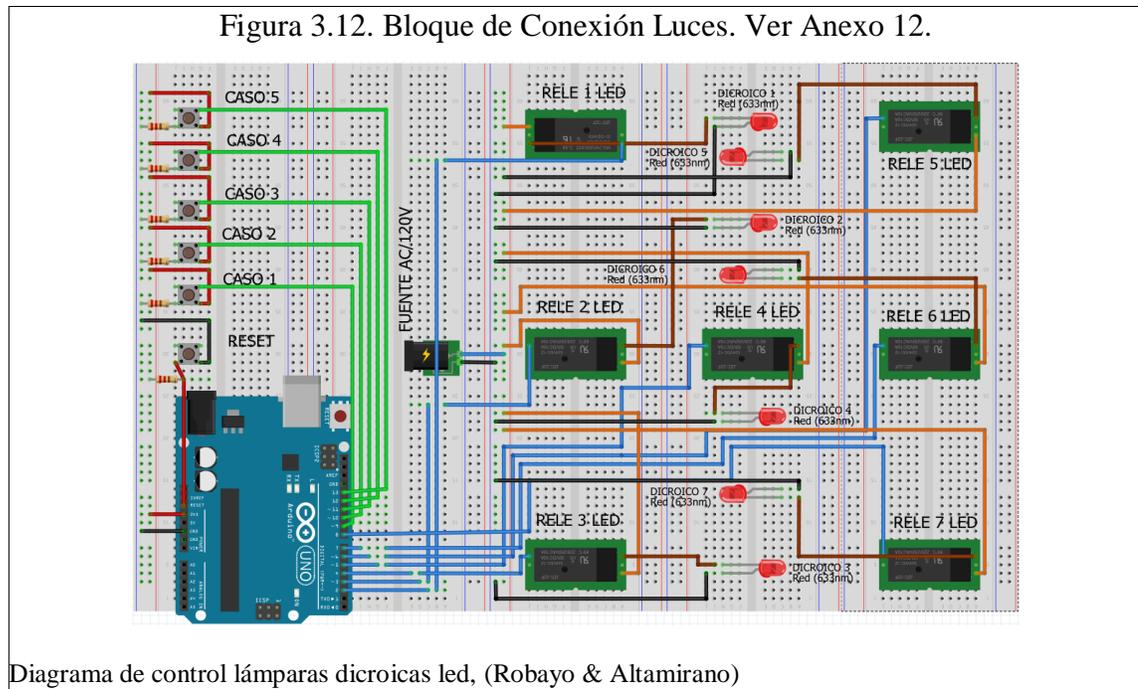


Diagrama de control para los actuadores lineales. Ver Anexo 11, (Robayo & Altamirano).

### 3.4 Implementación Eléctrico - Electrónico del Circuito de Control de Luces

El diseño del circuito de control de luces está dividido en dos etapas. La primera etapa es la implementación del circuito electrónico, donde consta de una tarjeta Arduino Uno, un módulo de relés. La segunda etapa es la implementación del circuito eléctrico que consta de las siete lámparas led dicroicas. Ver Figura 3.12.



El principal funcionamiento de la secuencia de encendido y apagado de las lámparas led dicroicas es el reemplazar el movimiento de la luz solar sobre los paneles fotovoltaicos, consiguiendo que la incidencia de luz sobre los paneles fotovoltaicos sea óptima. Este control de la secuencia de luces ayuda a la demostración del funcionamiento automático de la plataforma Stewart Gough.

### 3.5 Implementación de la Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario fue diseñada por medio de la herramienta GUIDE del software Matlab 2015b, se divide en tres ventanas diferentes:

- Ventana de Bienvenida: Esta ventana consta de tres botones y un selector, en el cual el usuario podrá seleccionar la forma de control (Manual o Automático) de la

plataforma Stewart Gough y un selector de demostraciones de movimientos pre-establecidos para la comprobación de la plataforma Stewart Gough, además de un boton de cerrar la ventana actual.

Figura 3.13. Ventana de bienvenida para el control de la Plataforma Stewart Gough



Interfaz de usuario principal, (Robayo & Altamirano)

- Ventana de Control Manual: En esta ventana el usuario podrá controlar manualmente la plataforma Stewart Gough de la siguiente manera:
  - Movimiento traslacional: Se activan 2 motores a la vez es decir el usuario puede controlar el movimiento ascendente y descendente de los actuadores lineales; al mismo tiempo es posible visualizar el aumento y disminución del valor de voltaje de la señal de entrada hacia la tarjeta de programación Arduino Mega.
  - Movimiento rotacional: Se pueden visualizar los valores de conversión analógica - digital, el voltaje actual y la distancia de desplazamiento de cada actuador lineal en el cuadro de lectura de entrada. Posee movimientos de derecha e izquierda además permite realizar el movimiento individual de cada actuador.

- Lectura de voltaje existente en los paneles fotovoltaicos: El usuario podrá conocer el voltaje suministrado por cada uno de los paneles solares al presionar el boton denominado “Voltaje de paneles”.
- Control de velocidad de los actuadores: A cada uno de los actuadores se los configuró inicialmente a una velocidad máximo del 50% como medida de protección; sin embargo el usuario tiene la opción de aumentar o disminuir esta velocidad a través del slider.
- Pantalla de usuario: Permite visualizar los voltajes en cada uno de los paneles y advierte al usuario que los actuadores han cumplido con la programación establecida; acorde a la distancia óptima para el entorno de la plataforma Stewart - Gough, esto como medida de protección para los actuadores.
- Posición inicial: Permite a los actuadores de la plataforma Stewart-Gough regresar al punto de inicio, es decir, la carrera de cada actuador esta en 0 cm.
- Parar: Permite a los actuadores de la plataforma Stewart-Gough detenerse instantaneamente en cualquier rutina que este ejecutando.

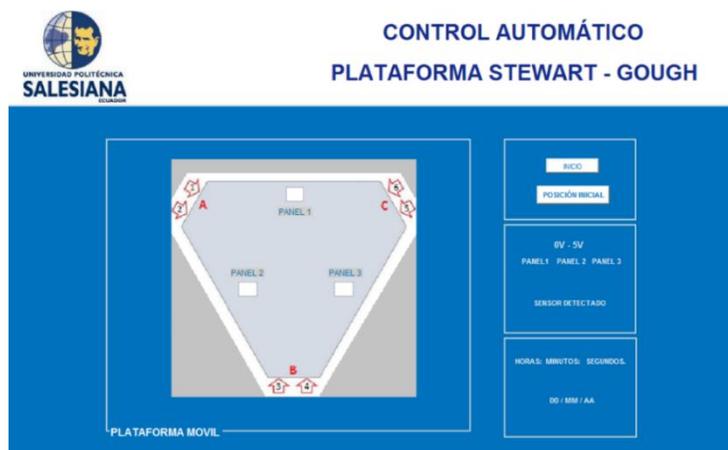
Figura 3.14. Ventana de Control Manual para la Plataforma Stewart Gough



Interfaz de usuario manual, (Robayo & Altamirano)

- Ventana de Control Automático: Esta ventana permite al usuario visualizar y gestionar el accionamiento de los paneles fotovoltaicos que estén en funcionamiento por medio de una luz indicadora; además de los valores existentes de voltaje de los mismos. Es posible almacenar en una hoja de cálculo del software Microsoft Excel los valores antes mencionados, incluyendo la hora, fecha en la que los sensores captan la incidencia de luz.

Figura 3.15. Ventana de Control Automático para la Plataforma Stewart Gough

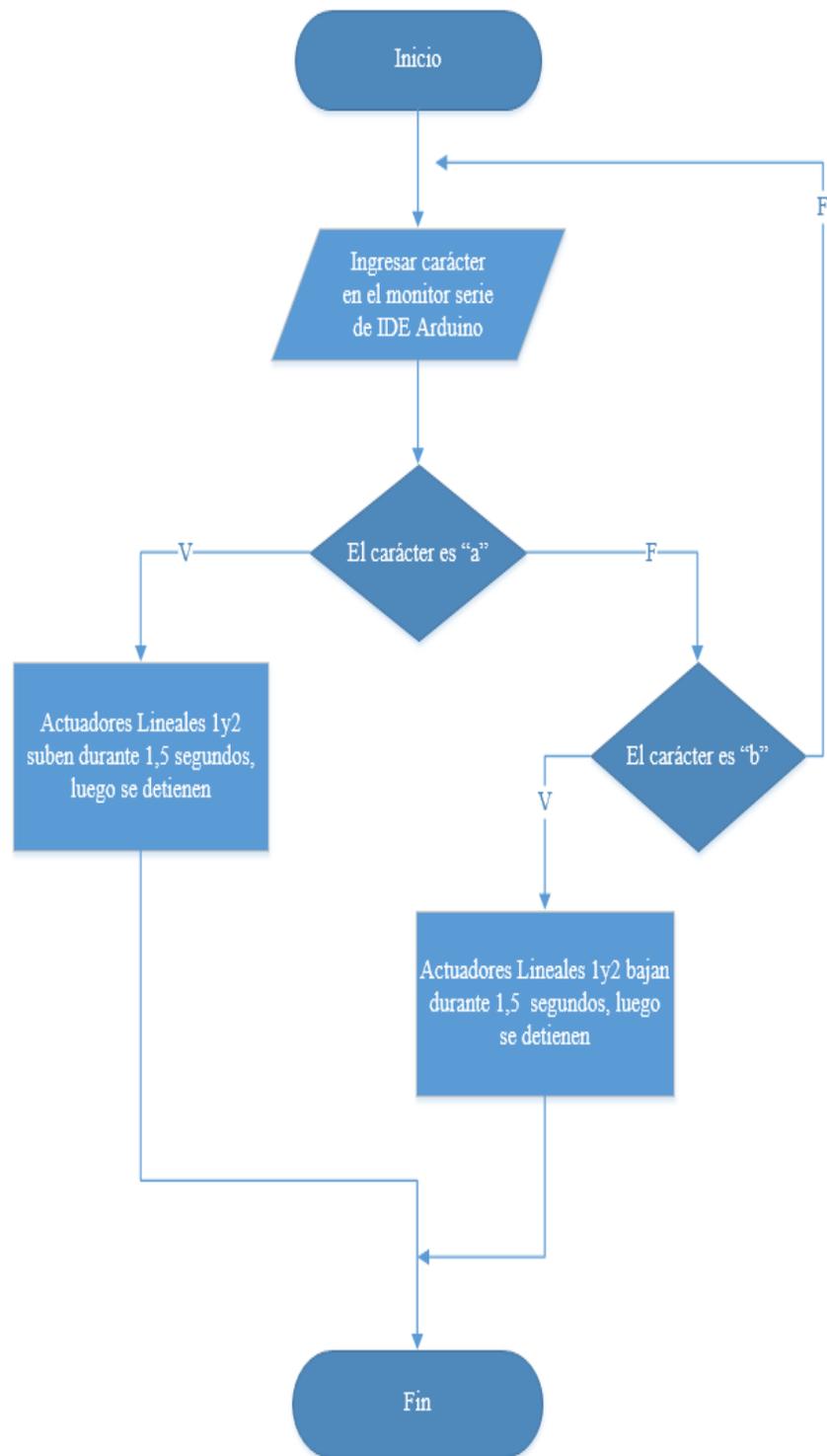


Interfaz de usuario para el mando automático, (Robayo & Altamirano)

### 3.6 Programación de la Plataforma Mediante Software de Arduino

Inicialmente se desarrolló una programación básica en el IDE de Arduino para comprobar el funcionamiento de cada uno de los actuadores lineales a través de la comunicación serial RS232, el usuario podrá enviar el carácter (“a”) para la activación de los motores 1 y 2, el carácter (“b”) para la desactivación de los mismos; así sucesivamente con los demás motores.

Figura 3.16. Flujograma de control de los actuadores lineales.



Comprobación del movimiento de los actuadores mediante programación, (Robayo & Altamirano)

Figura 3.17. Control de los actuadores por medio del monitor serie del IDE de Arduino

```
if (dato=='a')
{ // on

// Motor gira en un sentido
digitalWrite (2, HIGH); // sube M1
digitalWrite (4, HIGH); // sube M2
digitalWrite (3, LOW);
digitalWrite (5, LOW);
delay(1500);
// Motor no gira
digitalWrite (2, LOW);
digitalWrite (4, LOW);
delay(1000);
})

if (dato=='b')
{ // down

// Motor gira en sentido inverso
digitalWrite (3, HIGH); //baja M1
digitalWrite (5, HIGH); // bja M2
delay(1500);
// Motor no gira
digitalWrite (3, LOW);
digitalWrite (5, LOW);
delay(1000);
}
```

Comandos de programación en IDE Arduino, (Robayo & Altamirano)

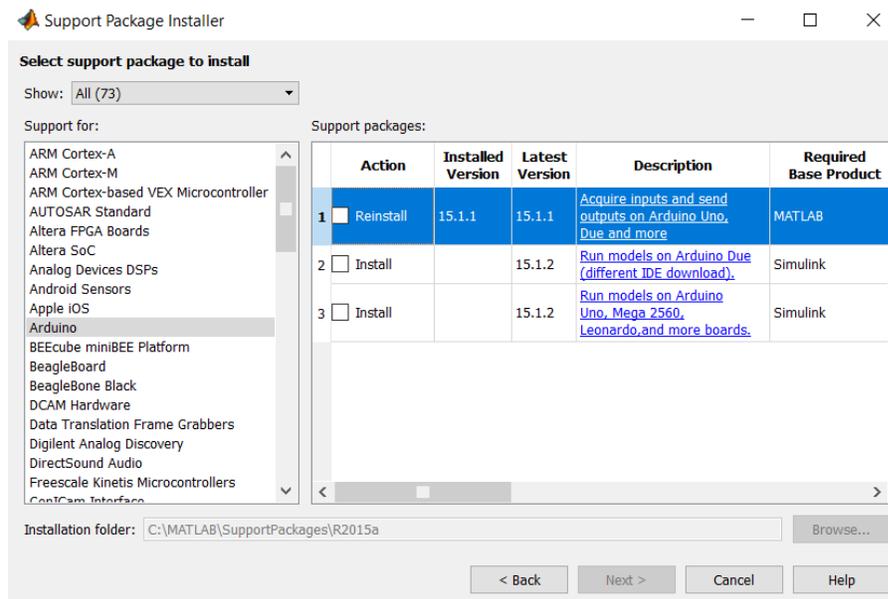
### 3.7 Programación en el Software Matlab utilizando Librerías de Arduino

El software de Matlab posee características y capacidades que son amigables con tarjetas de programación, este es el caso de la tarjeta Arduino Mega la cual puede comunicarse con el software Matlab por medio de los paquetes de soporte (Support Package); además de adquirir datos de sensores analógicos, digitales y controlar otros dispositivos con salidas digitales, PWM, etc.

Cabe mencionar que antes de instalar la arquitectura de entrada y salida en Arduino es necesario poseer una cuenta en MathWorks e iniciar sesión. A continuación en la Figura 3.18 se detalla el direccionamiento a seguir dentro del software Matlab para acceder a la ventana Support Package installer.

Home → Resources → Add-ons → Install from Internet → Next-Support Package Installer → support for: Arduino → support packages: install/15.1.1/15.1.1/MATLAB.

Figura 3.18. Instalador Paquete de Soporte Arduino-Matlab.



Configuración para instalar el paquete de soporte, (Robayo & Altamirano)

### 3.8 Configuración de las Señales PWM para el Control de los Actuadores Lineales

Para controlar la velocidad de los actuadores lineales se configuró la señal PWM de cada motor, mediante la programación de los pines digitales designados como enable (8,9,10,11,12,13) en la Tarjeta Arduino Mega 2560.

Dentro de la programación del control manual se seteo la velocidad inicial al 50% de su capacidad de trabajo (32 mm/s) en cada actuador lineal. El comando de programación en Matlab que permite el control de la señal PWM en cada actuador es el “*writePWMDutyCycle(a,'D#',PWM%);*”; los argumentos de entrada dentro del paréntesis de la línea de programación serán detallados a continuación:

- La variable global “a” corresponde a una etiqueta que representa la comunicación entre el software Matlab con la tarjeta Arduino Mega,
- El caracter “D#” representa el número de pin digital usado para cada actuador lineal que se requiera controlar su velocidad,
- El caracter “PWM%” representa el ciclo de trabajo en porcentaje mediante un valor comprendido entre 0 y 1.

En la Figura 3.19, se observa las líneas de programación para cada uno de los seis actuadores lineales usados en la plataforma Stewart-Gough.

Figura 3.19. Código de programación para el control de velocidad con PWM.

```
writePWMDutyCycle(a, 'D8', 0.5);  
writePWMDutyCycle(a, 'D9', 0.5);  
writePWMDutyCycle(a, 'D10', 0.5);  
writePWMDutyCycle(a, 'D11', 0.5);  
writePWMDutyCycle(a, 'D12', 0.5);  
writePWMDutyCycle(a, 'D13', 0.5);
```

Comando de programación PWM, (Robayo & Altamirano)

Las líneas de programación anterior dan la posibilidad de aumentar o disminuir dicha velocidad mediante una slider ubicado en la interfaz de usuario como se puede ver en la Figura 3.20.

Figura 3.20. Barra de desplazamiento que permite el control manual de los actuadores.



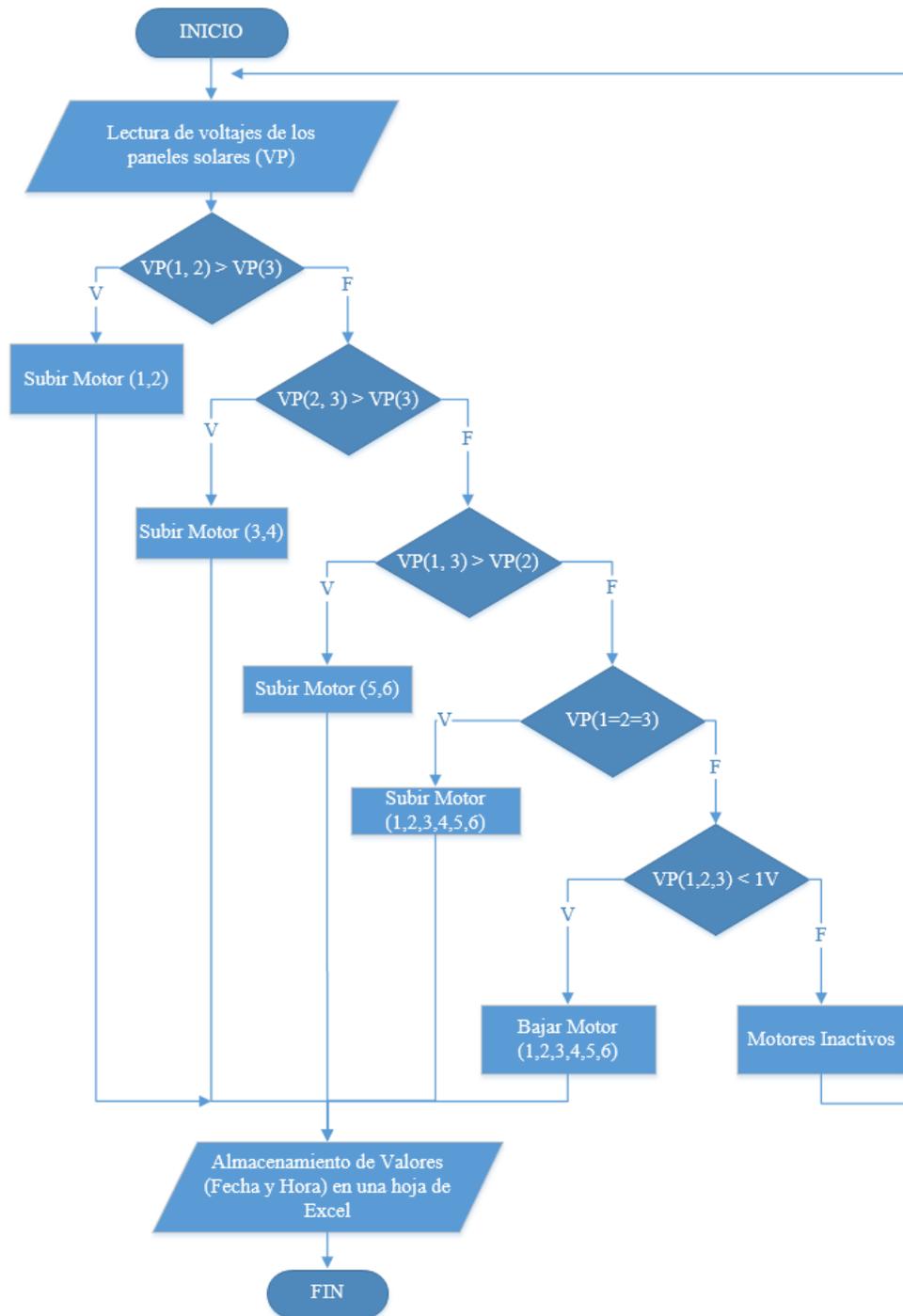
Control de velocidad para los actuadores lineales, (Robayo & Altamirano)

### 3.9 Funcionamiento

En la Figura 3.21, se observa el diagrama de flujo del funcionamiento del control automático de la plataforma Stewart-Gough a través de la interfaz de usuario.

Se inicia con la lectura de los voltajes que se encuentran en cada panel fotovoltaico; seguido de un algoritmo de programación desarrollado mediante comparaciones entre los paneles fotovoltaicos que presenten la mayor cantidad de voltaje, permitiendo el accionamiento de los actuadores lineales asignados en la programación; finalmente se registra en una hoja de Excel del software Microsoft los valores del voltaje con la hora y fecha en que fueron detectados.

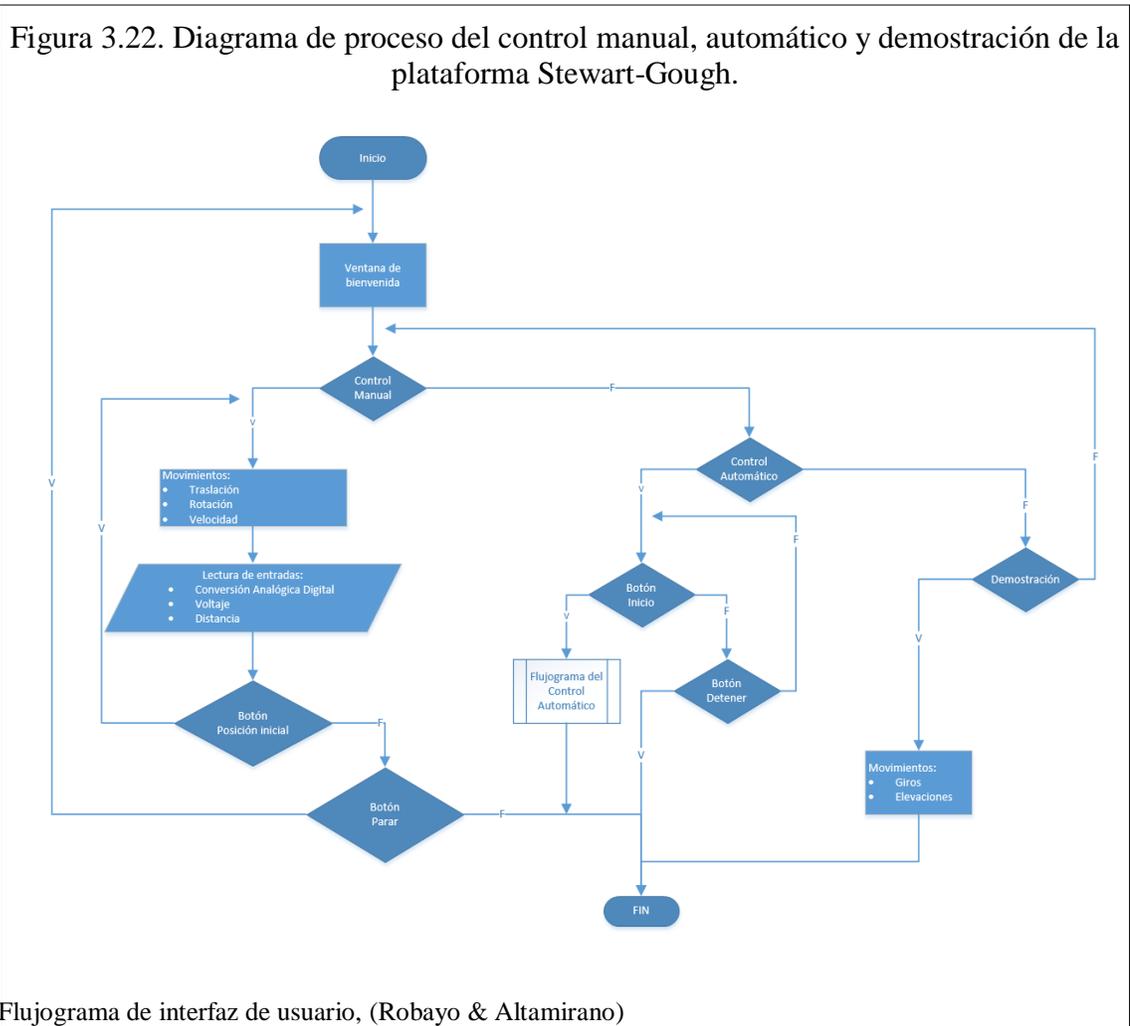
Figura 3.21. Diagrama del funcionamiento del control automático de la plataforma Stewart-Gough.



Flujograma del funcionamiento del control automático, (Robayo & Altamirano)

El diagrama de proceso se subdivide en tres partes como se indica en la descripción de la interfaz de usuario antes mencionada.

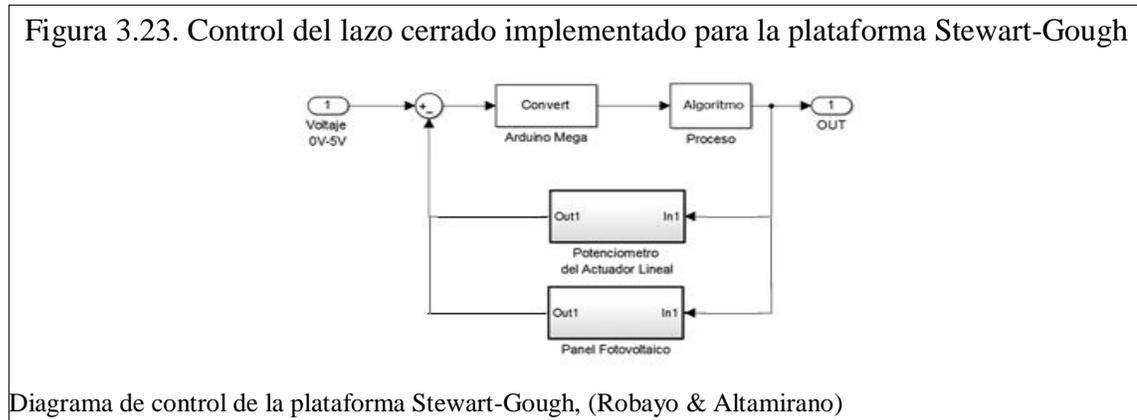
- a) El control manual,
- b) El control automático y
- c) La demostración de movimientos de la plataforma Stewart-Gough.



### 3.9.1 Principios del Control de Lazo Cerrado (Feedback)

En la Figura 3.23, se observa el diagrama de control de lazo cerrado para la plataforma Stewart, la cual recibe como señal de entrada un rango de voltaje de 0 a 5 voltios que proporcionan los paneles fotovoltaicos, los mismos que son digitalizados por medio de la tarjeta Arduino Mega para ser procesados mediante un algoritmo de programación en el

software Matlab. La realimentación del proceso depende de la incidencia de luz en los paneles fotovoltaicos como también de la distancia en la que se encuentran los actuadores lineales por medio de la lectura de voltaje de los mismos.



### 3.9.2 Comandos de Programación Matlab - Arduino

A continuación, serán descritos los comandos de programación más relevantes usados dentro del software Matlab para el control de la plataforma Stewart-Gough. Para conocer los valores reales de voltaje en cada actuador lineal se usó el comando “*readVoltage('pin')*” además el mismo se utilizará para identificar el valor de voltaje de los tres paneles solares ubicados en la base móvil de la plataforma. Se denotó a la matriz de 1 x 6 con el nombre “x” con la cual se pudo almacenar los valores de voltaje de cada actuador como se observa en la Figura 3.24. De la misma manera se denotó a la matriz de 1 x 6 con el nombre “r” para el almacenamiento de los valores de los voltajes de los tres paneles fotovoltaicos.



La matriz denominada “f” se usó para la activación de los actuadores lineales conocidos como salidas dentro de la programación de la tarjeta Arduino. A través del comando

“*writeDigitalPin(a, 'D#'f(i,j));*” donde “a” es la comunicación entre el software Matlab con la tarjeta Arduino Mega y el carácter “D#” representa el número de pin digital usado para cada actuador lineal que se requiera controlar su velocidad y finalmente “*f(i,j)*” especifica el actuador que se requiera activar, como se observa en la Figura 3.25.

Figura 3.25. Escritura de salidas (actuadores lineales).

```
f = [1 1 1 1 1 1]

writeDigitalPin(a, 'D2', f(1,1));
writeDigitalPin(a, 'D4', f(1,2));
writeDigitalPin(a, 'D22', f(1,3));
writeDigitalPin(a, 'D26', f(1,4));
writeDigitalPin(a, 'D23', f(1,5));
writeDigitalPin(a, 'D27', f(1,6));
```

Activación de los actuadores lineales a través del vector F, (Robayo & Altamirano)

En la Figura 3.26, se observa el comando *clock* “reloj” permite determinar la fecha y hora actual de la ejecución de una acción determinada, en este caso se obtendrán estos datos cuando exista incidencia de luz sobre los paneles fotovoltaicos. El comando “*c=fix(clock)*” requiere de un lugar de almacenamiento en este caso se usa la letra “c”. A través de las líneas de programación “*cd= [c (i, j)]*” y “*cf= [c (i, j)]*” se estableció la hora, minuto, segundo y el año, mes, día respectivamente en cada comando. El orden de almacenamiento se observa en la Figura 3.27.

Figura 3.26. Comando de reloj y almacenamiento en Excel.

```
c=fix(clock)
cd=[c(1,4),c(1,5),c(1,6)]
cf=[c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
set(handles.text4,'String',num2str(cf));
set(handles.text3,'String',num2str(cd));
set(handles.text8,'String','2,3');
cddd=[c(1,4),c(1,5),c(1,6),c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
xlswrite('repo.xls',cddd,'sensor_2_3','a1')
```

Almacenamiento de tiempo y fecha a través de la activación de un panel fotovoltaica, (Robayo & Altamirano)

Figura 3.27. Orden de almacenamiento del comando de reloj.

2016	12	26	8	33	59
c(1,1)	c(1,2)	c(1,3)	c(1,4)	c(1,5)	c(1,6)

Ejemplo de la visualización gráfica del vector clock, (Robayo & Altamirano)

Al realizar un análisis entre cada comparación de los valores de voltaje de los paneles solares se determinó que existen seis posibles combinaciones, las mismas que han sido traducidas al lenguaje de programación de software Matlab. En la Figura 3.28 se observa una línea de programación usando comparaciones las cuales permitieron que los seis actuadores se activen cuando los valores de voltaje de cada panel fotovoltaico sean mayores a 2 voltios y menor a casi 4 voltios.

Figura 3.28. Comparación entre los valores de voltaje de los paneles fotovoltaicos.

```
if ( r(1,1)>=2 && r(1,1)<=3.6 ) && ( r(1,2)>=1 && r(1,2)<=2.8 ) && ( r(1,3)>=2.20 && r(1,3)<=3.3 )
    disp('all up')
```

Algoritmo de proceso entre los paneles fotovoltaicos, (Robayo & Altamirano)

Cuando los paneles fotovoltaicos no detecten luz sobre ellos habiéndose activado en un proceso anterior, es necesario que los actuadores regresen a su posición inicial; se requiere de dos importantes condiciones a continuación descritas:

El valor de voltaje en el panel fotovoltaico 1 deberá ser menor a 1.4 voltios

Los valores de voltaje en los sensores internos de los motores (1,2,5,6) deberán ser mayores a 0.5 voltios.

Es muy importante que estas dos condiciones se cumplan, sin embargo, nuevamente se leerán los valores de voltaje de los seis motores verificando que sean menor a 1 voltio para que se activen, como se observa en la Figura 3.29.

Figura 3.29. Condiciones para retomar la posición inicial

```
if (r(1,1) < 1.4) && (x(1,1) > 0.5) && (x(1,5) > 0.5) && (x(1,2) > 0.5) && (x(1,6) > 0.5)

ff = [1 1 0 0 1 1]
writeDigitalPin(a, 'D3', ff(1,1));
writeDigitalPin(a, 'D5', ff(1,2));
writeDigitalPin(a, 'D24', ff(1,3));
writeDigitalPin(a, 'D28', ff(1,4));
writeDigitalPin(a, 'D25', ff(1,5));
writeDigitalPin(a, 'D29', ff(1,6));

if x < 1

writeDigitalPin(a, 'D3', 0);
writeDigitalPin(a, 'D5', 0);
writeDigitalPin(a, 'D24', 0);
writeDigitalPin(a, 'D28', 0);
writeDigitalPin(a, 'D25', 0);
writeDigitalPin(a, 'D29', 0);

end
```

Algoritmo de posición inicial, (Robayo & Altamirano)

## CAPITULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA PALTAFORMA STEWART GOUGH

#### 4.1 Pruebas

A continuación, se ha realizado un análisis de los movimientos que puede realizar la plataforma móvil con respecto a los ejes de la Plataforma Stewart Gough antes determinados. Esto es muy importante tenerlo presente para comprender los respectivos movimientos en la ejecución de la plataforma móvil, con respecto a la ubicación de los actuadores lineales.

Tabla 4.1. Descripción del contenido de cada grupo de motores.

CONJUNTO	MOTORES
A	1,2
B	3,4
C	5,6

Tabla de asignación de actuadores lineales, Fuente: (Robayo & Altamirano)

En la realización de las pruebas de la SGP es necesario conocer las distintas direcciones que podrá tomar la plataforma móvil debido a la incidencia de luz detectada por los tres paneles fotovoltaicos como se observa en la Tabla 4.2

Tabla 4.2. Combinaciones posibles del orden de activación con respecto al grupo de sensores.

N° de Combinaciones	Sensores Activados	Dirección (con respecto a los ejes determinados)
1	1,2	Inclinación hacia la derecha del conjunto de motores A.
2	2,3	Inclinación hacia atrás del conjunto de motores B.
3	1,2,3	Ascenso de los conjuntos de motores A, B y C.
4	3,1	Inclinación hacia la izquierda del conjunto de motores C.
5	1	Inclinación hacia adelante del conjunto de motores A y C.

Tabla de movimientos del conjunto de motores A, B y C, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Después de realizar las pruebas con los diferentes movimientos de la SGP se pudo obtener 20 muestras de los valores de voltaje detectados en los tres paneles fotovoltaicos cuando ejecutaron la quinta combinación, comprobando que la incidencia de luz entre los tres

paneles fotovoltaicos fue similar, al promediar dichas muestras, se obtuvo un resultado de aproximadamente 2,5 voltios, como se observa en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Recopilación de los valores de voltaje de los tres paneles fotovoltaicos durante la incidencia de luz.

<b>Muestras</b>	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>
<b>1</b>	3,0810547	2,2363281	2,8808594
<b>2</b>	3,7695313	2,8271484	3,2861328
<b>3</b>	1,8164063	2,3242188	3,3056641
<b>4</b>	2,2705078	2,1826172	3,3154297
<b>5</b>	2,1923828	2,4023438	3,2275391
<b>6</b>	2,1484375	2,5097656	0,8154297
<b>7</b>	1,8945313	2,539453	1,484375
<b>8</b>	1,6796875	3,0859375	2,4169922
<b>9</b>	1,7285156	2,3974609	2,9638672
<b>10</b>	2,2949219	2,2900391	3,2714844
<b>Promedio</b>	<b>2,28759767</b>	<b>2,47953124</b>	<b>2,69677736</b>
<b>11</b>	3,2519531	2,6171875	3,2226563
<b>12</b>	2,9150391	2,7294922	1,9726563
<b>13</b>	2,9736328	2,1777344	3,4228516
<b>14</b>	3,125	2,4414063	3,5742188
<b>15</b>	1,6455078	2,8515625	1,3183594
<b>16</b>	2,8417969	2,6806641	3,1298828
<b>17</b>	3,5498047	2,1679688	2,6904297
<b>18</b>	2,2460938	2,34375	1,2646484
<b>19</b>	2,4462891	2,9443359	2,5585938
<b>20</b>	1,6748047	2,5571289	2,6098633
<b>Promedio</b>	<b>2,6669922</b>	<b>2,55112306</b>	<b>2,57641604</b>
<b>Promedio Total</b>	<b>2,47729494</b>	<b>2,51532715</b>	<b>2,6365967</b>
	(S1,S2,S3) > 2,5 [V]		
	2,543072928 > 2,5 [V]		

Toma de los valores de voltaje de los tres paneles fotovoltaicos, (Robayo & Altamirano)

## 4.2 Resultados

Atraves de la activación de las secuencias de encendido y apagado de las siete lámparas diroicas led, se comprobó el desempeño óptimo de la SGP. Debido a que cada secuencia tuvo cinco diferentes rutinas aleatorias las cuales se pueden observar en la Tabla 4.4. Los números colocados en la parte de luces corresponden a las lámparas que se van a encender en ese momento y los números en la parte de sensor corresponden a los sensores que serán activados en cada una de las rutinas.

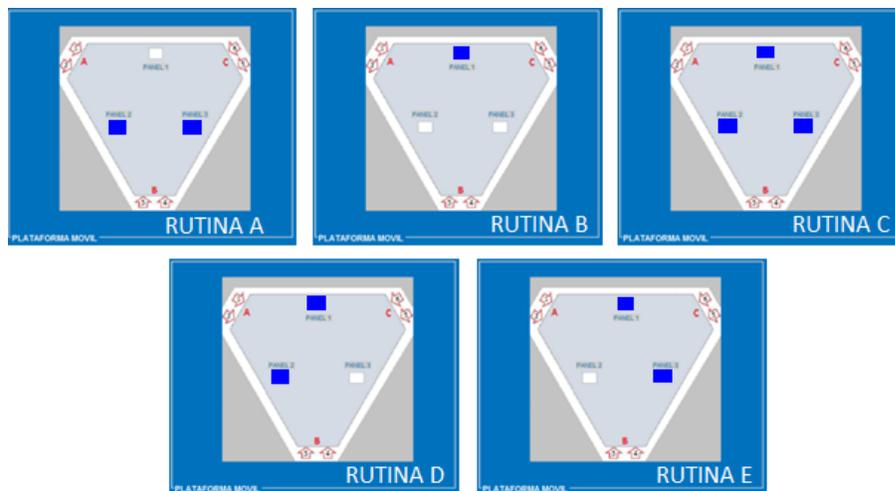
Tabla 4.4. Posibles secuencias de encendido y apagado de las lámparas diroicas led

PRIMERA SECUENCIA			SEGUNDA SECUENCIA			TERCERA SECUENCIA			CUARTA SECUENCIA		
RUTINA	LUCES	SENSOR	RUTINA	LUCES	SENSOR	RUTINA	LUCES	SENSOR	RUTINA	LUCES	SENSOR
A	2-3-4	2-3	E	4-8	3-1	D	2-6	1-2	C	5	1-2-3
B	6-7-8	1	B	6-7-8	1	C	5	1-2-3	A	2-3-4	2-3
C	5	1-2-3	D	2-6	1-2	A	2-3-4	2-3	E	4-8	3-1
D	2-6	1-2	A	2-3-4	2-3	E	4-8	3-1	B	6-7-8	1
E	4-8	3-1	C	5	1-2-3	B	6-7-8	1	D	2-6	1-2

Orden aleatorio de la activación de las lámparas, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Indistintamente de la activación de cualquier secuencia de las lámparas se pudo visualizar mediante la ventana de control automático como cada indicador localiza la incidencia de luz sobre cada uno de paneles fotovoltaicos, como se observa en la Figura 4.1.

Figura 4.1. Funcionamiento de la plataforma móvil con respecto a la secuencia de luces



Ejemplo de activación de los sensores activados durante la primera secuencia, (Robayo & Altamirano)

Una vez establecidas las secuencias de encendido y apagado de las siete lámparas diroicas led, se procedió a verificar los movimientos de la plataforma móvil, a través de la recopilación de tres muestras por cada secuencia ejecutada; cada muestra que se realizó consto de cinco movimientos de la plataforma móvil que dependieron de la incidencia de luz sobre cada panel fotovoltaico.

Tabla 4.5. Ejecución de movimientos de la primera secuencia de luces

PRIMERA SECUENCIA DE LUCES				
N° MUESTRA	CONJUNTO DE MOTORES	PANEL 1	PANEL 2	PANEL 3
1	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
2	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
3	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		

Recopilación de las tres muestras en la primera secuencia de luces, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Tabla 4.6. Ejecución de movimientos de la segunda secuencia de luces

SEGUNDA SECUENCIA DE LUCES				
N° MUESTRA	CONJUNTO DE MOTORES	PANEL 1	PANEL 2	PANEL 3
1	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
2	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
3	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	
	B		2,5639648	2,9042969
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203

Recopilación de las tres muestras en la segunda secuencia de luces, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Tabla 4.7. Ejecución de movimientos de la tercera secuencia de luces

TERCERA SECUENCIA DE LUCES				
N° MUESTRA	CONJUNTO DE MOTORES	PANEL 1	PANEL 2	PANEL 3
1	A	2,8007813	2,9824219	
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
2	A	2,8007813	2,9824219	
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
3	A	2,8007813	2,9824219	
	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		

Recopilación de las tres muestras en la tercera secuencia de luces, Fuente: (Robayo & Altamirano)

Tabla 4.8. Ejecución de movimientos de la cuarta secuencia de luces

CUARTA SECUENCIA DE LUCES				
Nº MUESTRA	CONJUNTO DE MOTORES	PANEL 1	PANEL 2	PANEL 3
1	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	
2	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	
3	A, B y C	2,4772949	2,5185547	2,6533203
	B		2,5639648	2,9042969
	C	3,0837402		2,9616699
	A y C	3,5587404		
	A	2,8007813	2,9824219	

Recopilación de las tres muestras en la cuarta secuencia de luces, Fuente: (Robayo & Altamirano)

En las Tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8. Se tuvo como resultado los movimientos de cada conjunto de motores en cada secuencia ejecutada, Además, en estas tablas se pueden observar los valores de voltaje recibidos por cada panel fotovoltaico al ser activados.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Se implementó la plataforma Stewart-Gough con un sistema de control de lazo cerrado mediante un algoritmo basado en comparaciones y combinaciones de los valores de voltajes recibidos a través de los paneles fotovoltaicos ubicados en la plataforma móvil para seguir el movimiento de las diferentes secuencias de encendido de lámparas dicroicas led.

Se seleccionaron tres paneles fotovoltaicos con características de 5 V, 80mA, 0,4W, después de realizar varias pruebas con paneles fotovoltaicos de distintos valores de voltaje, determinando que con estos no fue necesario implementar ningún tipo de acondicionamiento para la señal de entrada analógica en la tarjeta Arduino debido a las características que posee.

Se construyó la estructura mecánica de la plataforma Stewart - Gough, a través de seis actuadores lineales cada uno con una carrera de 10 cm, una base fija hexagonal de madera con un espesor 3cm y una plataforma móvil hexagonal conformada por tres láminas de acrílico negro con un espesor de 2.4 cm, logrando desplazamientos angulares menores a 60 grados.

Se diseñó una interfaz gráfica de usuario mediante las herramientas proporcionadas por el guide de Matlab para el control manual y automático del robot didáctico (SGP).

Se comprobó que los valores de voltaje que fueron almacenados en un archivo Excel cuando la SGP estuvo en funcionamiento, presentaron una desventaja la cual fue que una vez generado los nuevos datos en el archivo estos solaparon a los datos anteriormente guardados.

Al analizar la recopilación de los datos tomados a través del reporte generado en Excel, se comprobó que los valores promedios de los voltajes en cada una de las

condiciones de los sensores trabajan con un voltaje promedio de 2.5V, determinando que es un valor óptimo para que los actuadores lineales ejecuten un movimiento ascendente equilibrado cuando exista un valor de voltaje mayor a 2,5 V en los 3 sensores.

Se obtuvo como resultado que, al recolectar las tres muestras tomadas de cada una de las secuencias, los movimientos de la plataforma móvil y los voltajes de cada uno de los sensores fueron idénticos en cada rutina, al incurrir la luz sobre los paneles fotovoltaicos.

Se controló el encendido y apagado de las siete lámparas led dicroicas ubicadas en la parte superior de la estructura de madera mediante la tarjeta Arduino UNO comprobando que los paneles fotovoltaicos captaron la mayor incidencia de luz para que la plataforma móvil de la SGP realice los correspondientes movimientos.

## 5.2 Recomendaciones

Utilizar sensores que trabajen con un voltaje de 0 a 5 V con mayor precisión que los paneles fotovoltaicos.

Usar una computadora con un procesador CORE i7 debido a los diferentes procesos que lleva a cabo el control de la interfaz para mejorar el rendimiento del prototipo en el tiempo de respuesta.

Se recomienda trabajar con los actuadores a una velocidad de 50% en la parte manual y 80% en la parte automática como medida de protección a través de líneas de programación.

Se recomienda una fuente de alimentación con valores máximos de 12VDC/ 2A para alimentar a los 6 actuadores lineales y a los 3 drivers motors (puente H) debido a que cada actuador posee una corriente máxima sin carga de 220 mA.

Para aplicaciones futuras se podría usar la SGP como un buscador autónomo de la luz solar para cargar baterías.

Controlar la SGP a través de la cinemática inversa tomando en cuenta que en esta aplicación no fue necesario usarla ya que los distintos movimientos de la plataforma móvil dependieron de la incidencia de luz recibida por los paneles fotovoltaicos.

## REFERENCIAS

- Actuonix. (05 de 09 de 2016). *Actuonix*. Obtenido de Actuonix:  
[http://www.actuonix.com/L16\\_Linear\\_Actuators\\_p/116-p.htm](http://www.actuonix.com/L16_Linear_Actuators_p/116-p.htm)
- Anderson, T. O. (20 de 01 de 2014). *Aalborg Universitet*. Obtenido de Desing of Stewart-Gough Platform as a Testup:  
[https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiljNvjyPjOAhVC1R4KHR8IAXQQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fvbn.aau.dk%2Fws%2Ffiles%2F181568921%2FDesign\\_of\\_a\\_Stewart\\_Gough\\_Platform\\_as\\_a\\_Test\\_Setup.pdf&usg=AFQjCNGOIKGe\\_X](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiljNvjyPjOAhVC1R4KHR8IAXQQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fvbn.aau.dk%2Fws%2Ffiles%2F181568921%2FDesign_of_a_Stewart_Gough_Platform_as_a_Test_Setup.pdf&usg=AFQjCNGOIKGe_X)
- Arduino. (2016). *Arduino USA ONLY*. Obtenido de [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)
- Correa, J., Vásquez, R., Ramírez, J., & Taborda, E. (2013). *Metal Actual*. Obtenido de Manipuladores Roboticos:  
[http://www.metalactual.com/revista/29/soldadura\\_roboticos.pdf](http://www.metalactual.com/revista/29/soldadura_roboticos.pdf)
- drabbe. (05 de 09 de 2016). *drabbe*. Obtenido de  
<http://www.drabbe.nl/productgroepen/c/kruis-koppeling-verbinding/p/din-71802/>
- Electronilab. (2014). *Tutorial: uso de driver L298N para motores dc y paso a paso con arduino*. . Obtenido de <http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>
- FlightSafety. (2016). *FlightSafety International Inc*. Obtenido de FlightSafety International Inc.:  
[http://www.flightsafety.com/fs\\_service\\_simulation\\_systems\\_cat.php?p=civ](http://www.flightsafety.com/fs_service_simulation_systems_cat.php?p=civ)

García, M. (2016). *Introducción a la robótica*. Obtenido de Serie Vida cotidiana y tecnología.: <http://bibliotecadigital.educ.ar/uploads/contents/ROBOTICA1.pdf>

García, S. (Octubre de 2013). *Renovetec Tecnología S. L.* Obtenido de Paneles Fotovoltaicos: Concepto y tipos: <http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/627-paneles-fotovoltaicos-concepto-y-tipos>

Jáuregui, J. (2010). *Robot Posicionador para el Espejo Secundario M2 del Gran Telescopio milimetrico.* Obtenido de [http://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v3-n1/Robot.pdf](http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v3-n1/Robot.pdf)

Júlia Borrás, Thomas, F., & Torras, C. (s.f.). *New Geometric Approaches to the Analysis and Design.*

Mendoza, E., & Perez, M. (2011). *La medicina y la realidad virtual.* Obtenido de <http://medicina2r.blogspot.com/p/la-medicina-y-la-realidad-virtual.html>

Moncada, E. (2014). *Da vinci, el robot cirujano presente en meditech.* Obtenido de Da vinci, el robot cirujano presente en meditech.: <http://www.estereofonica.com/tecnologia/da-vinci-el-robot-cirujano-presente-en-meditech-2014/>

MOTORGIGA. (03 de 10 de 2016). Obtenido de [www.motorgiga.com](http://www.motorgiga.com): <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/junta-de-cardan-definicion-significado/gmx-niv15-con194562.htm>

Pérez, E. (2015). *Tecnología en marcha. Metal actual*, 4-5.

Robayo, & Altamirano. (s.f.).

Robotics, F. (2005). Obtenido de FANUC Robotics:  
[http://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/F-200iB%20Series\\_9.pdf](http://www.fanucamerica.com/cmsmedia/datasheets/F-200iB%20Series_9.pdf)

Rosário, J. M., Dumur, D., & Moretti, M. (s.f.). Supervision and Control Strategies of a 6  
DOF Parallel Manipulator Using a Mechatronic Approach.

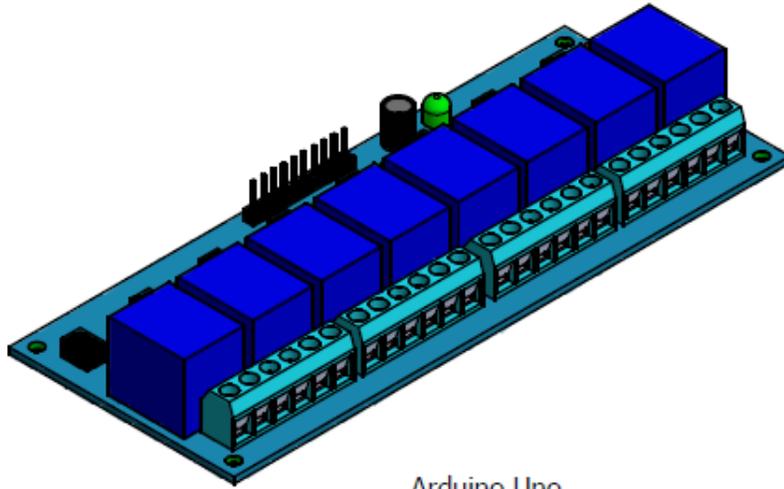
Universal, B. (13 de Julio de 2016). *Belden Universal Custom Engineered precision*.  
Obtenido de <http://www.beldenuniversal.com>

Villate, F. (2015). *Universidad Nacional De Colombia. Bogotá*. Obtenido de Diseño y  
construcción de prototipo para mecanizado multiejes en materiales blandos  
utilizando arquitectura paralela Stewart-Gough.:  
[www.bdigital.unal.edu.co/50951/1/74371282.2015](http://www.bdigital.unal.edu.co/50951/1/74371282.2015).

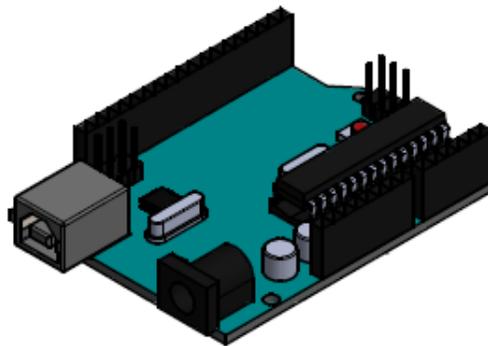
# **ANEXOS**

Anexo 1. Accesorios 1

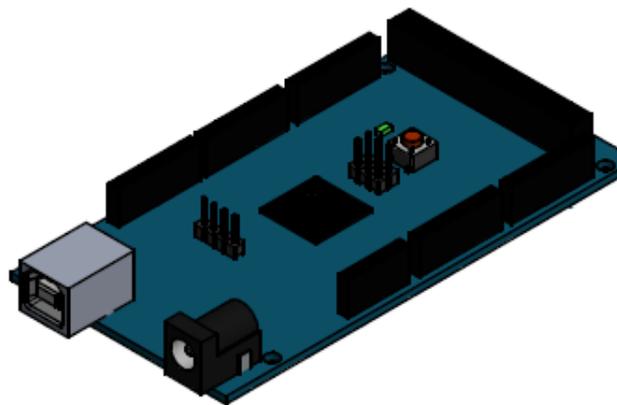
Placa de Relays



Arduino Uno

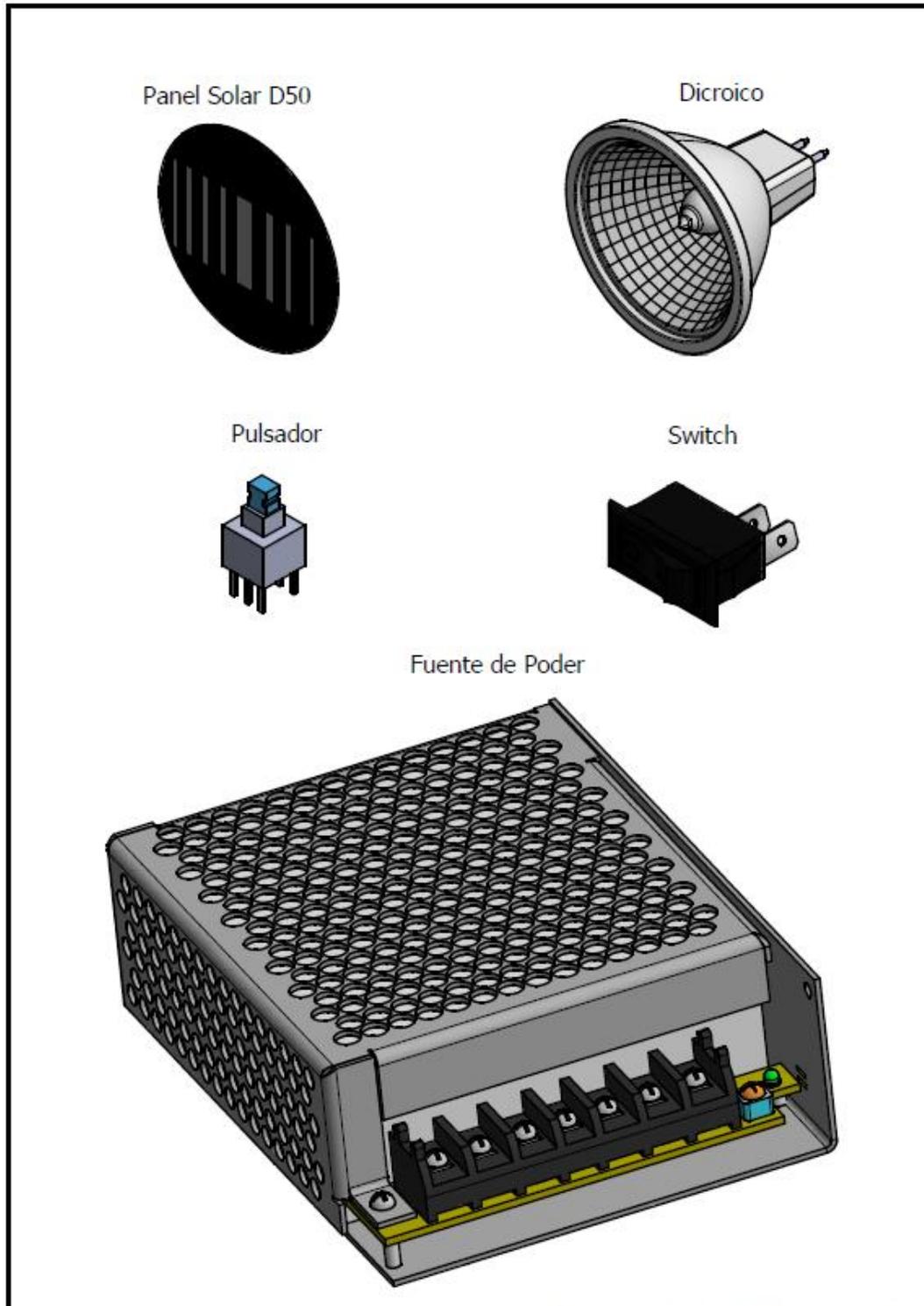


Arduino Mega



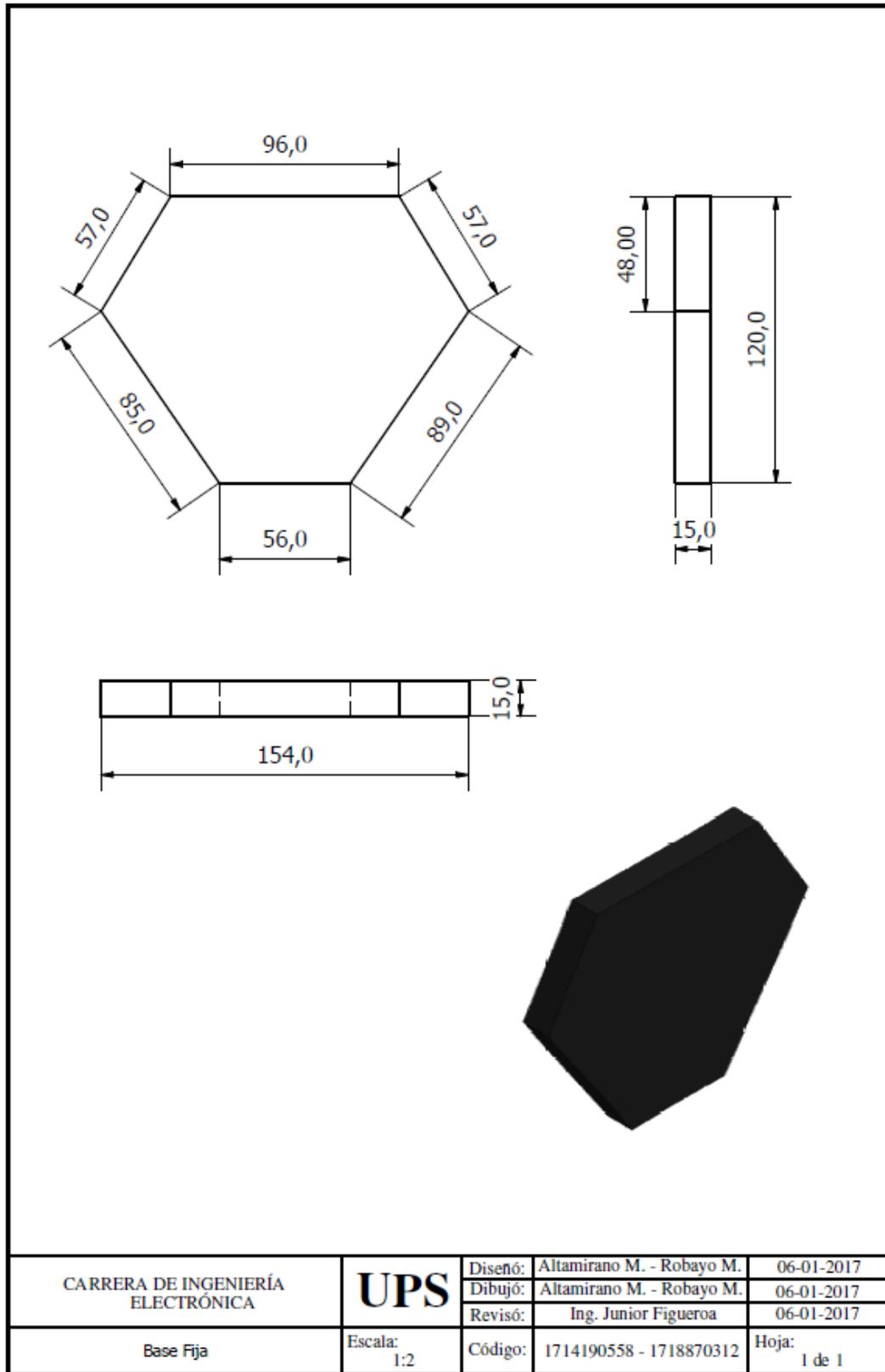
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	<b>UPS</b>	Diseño:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Dibujó:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Revisó:	Ing. Junior Figueroa	06-01-2017
Accesorios 1	Escala: 1:1	Código:	1714190558 - 1718870312	Hoja: 1 de 1

Anexo 2. Accesorios 2



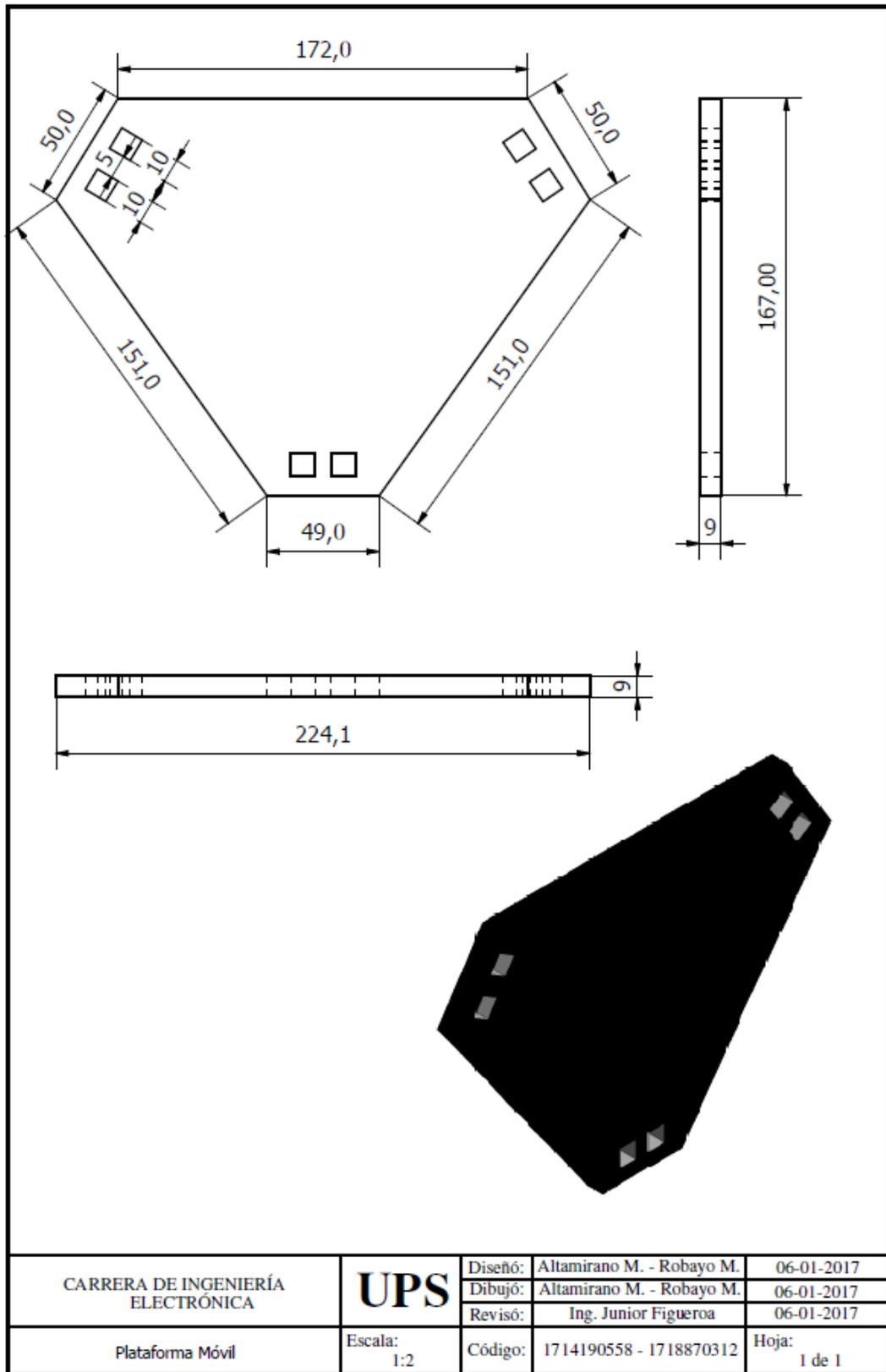
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	<b>UPS</b>	Diseño:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Dibujó:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Revisó:	Ing. Junior Figueroa	06-01-2017
Accesorios 2	Escala: 1:1	Código:	1714190558 - 1718870312	Hoja: 1 de 1

### Anexo 3. Base Fija plataforma Stewart Gough

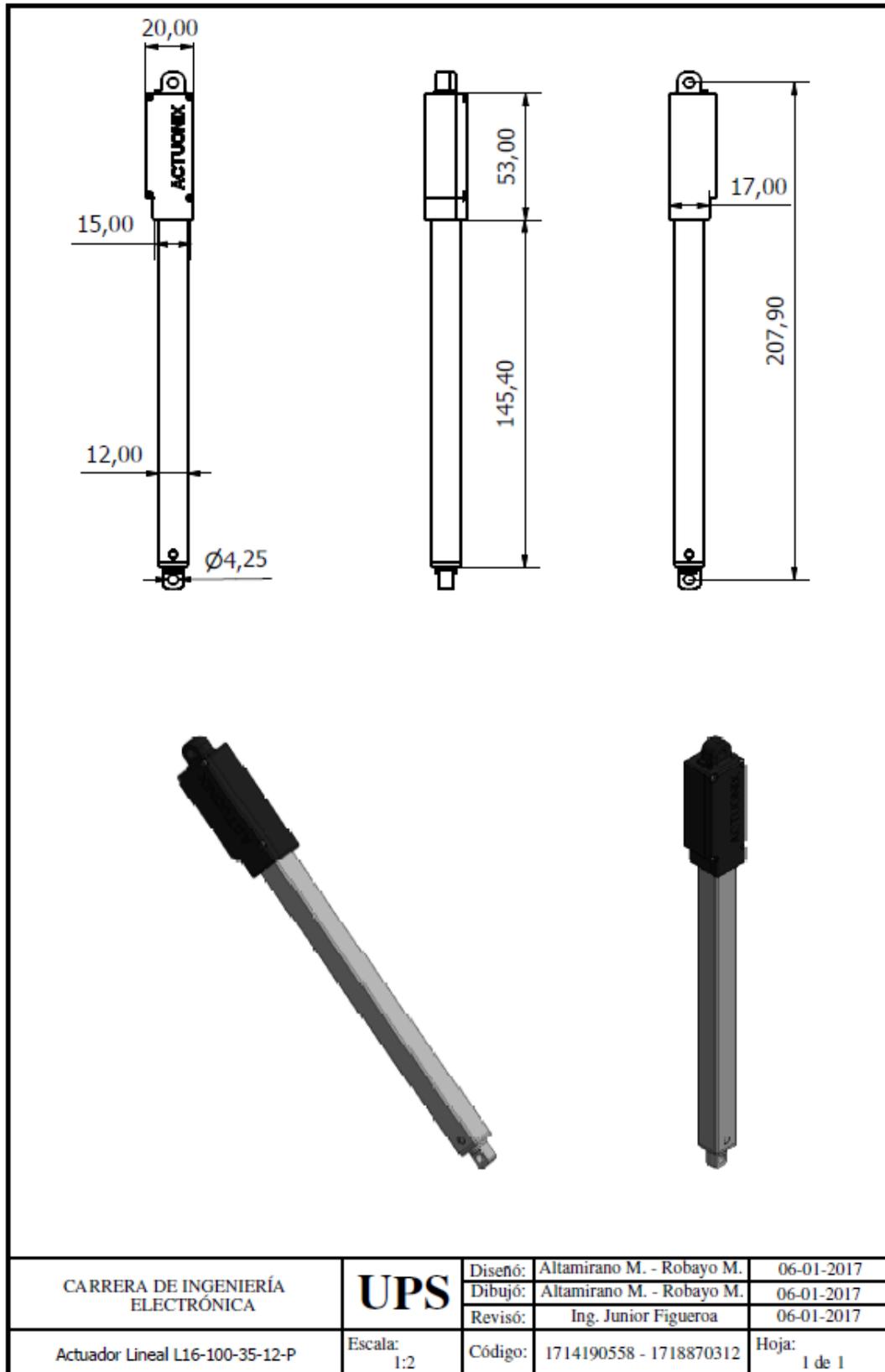


CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	<b>UPS</b>	Diseño:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Dibujó:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Revisó:	Ing. Junior Figueroa	06-01-2017
Base Fija	Escala: 1:2	Código:	1714190558 - 1718870312	Hoja: 1 de 1

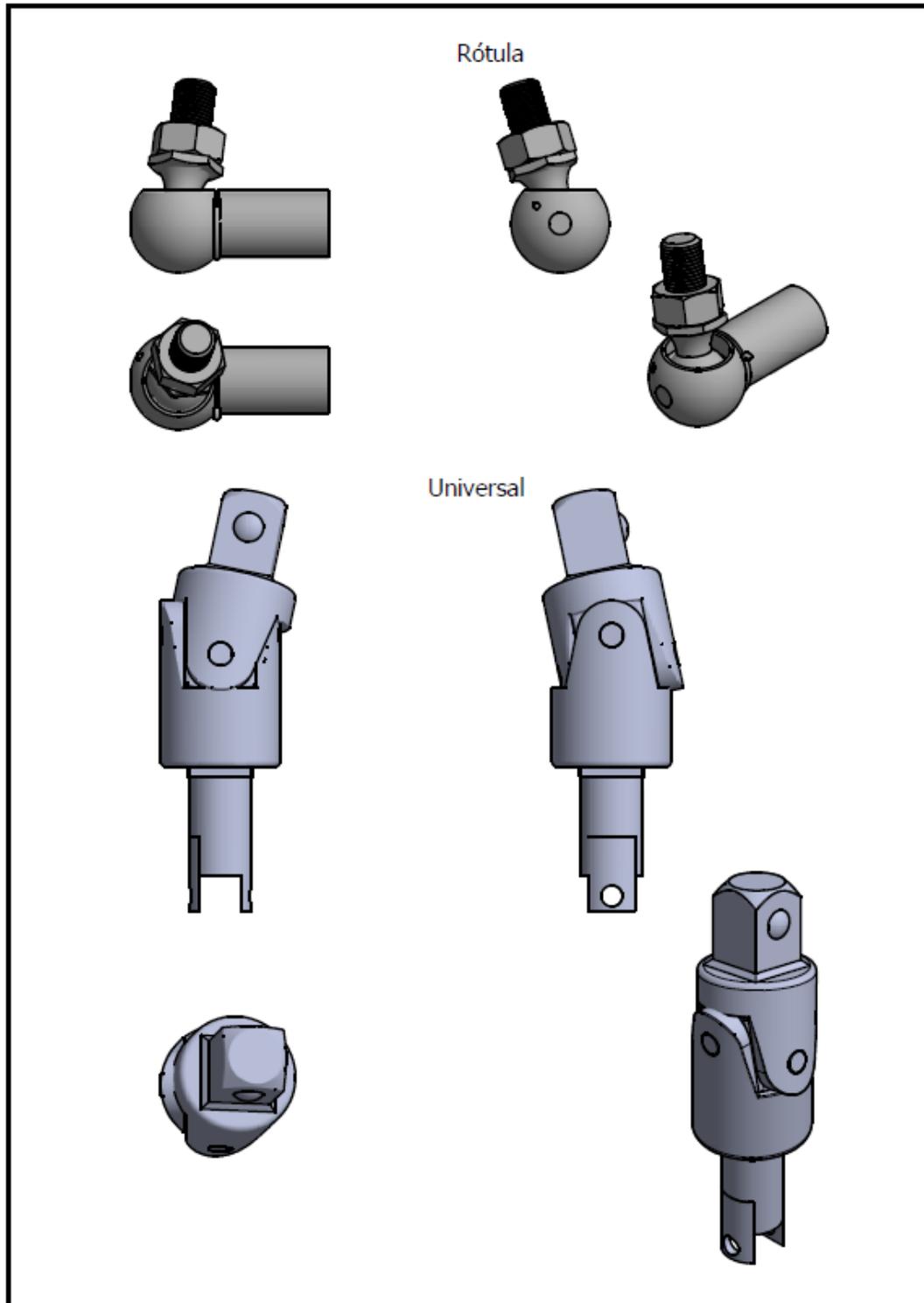
Anexo 4. Plataforma Móvil plataforma Stewart Gough



Anexo 5. Actuador Lineal L16-100-35-12-P

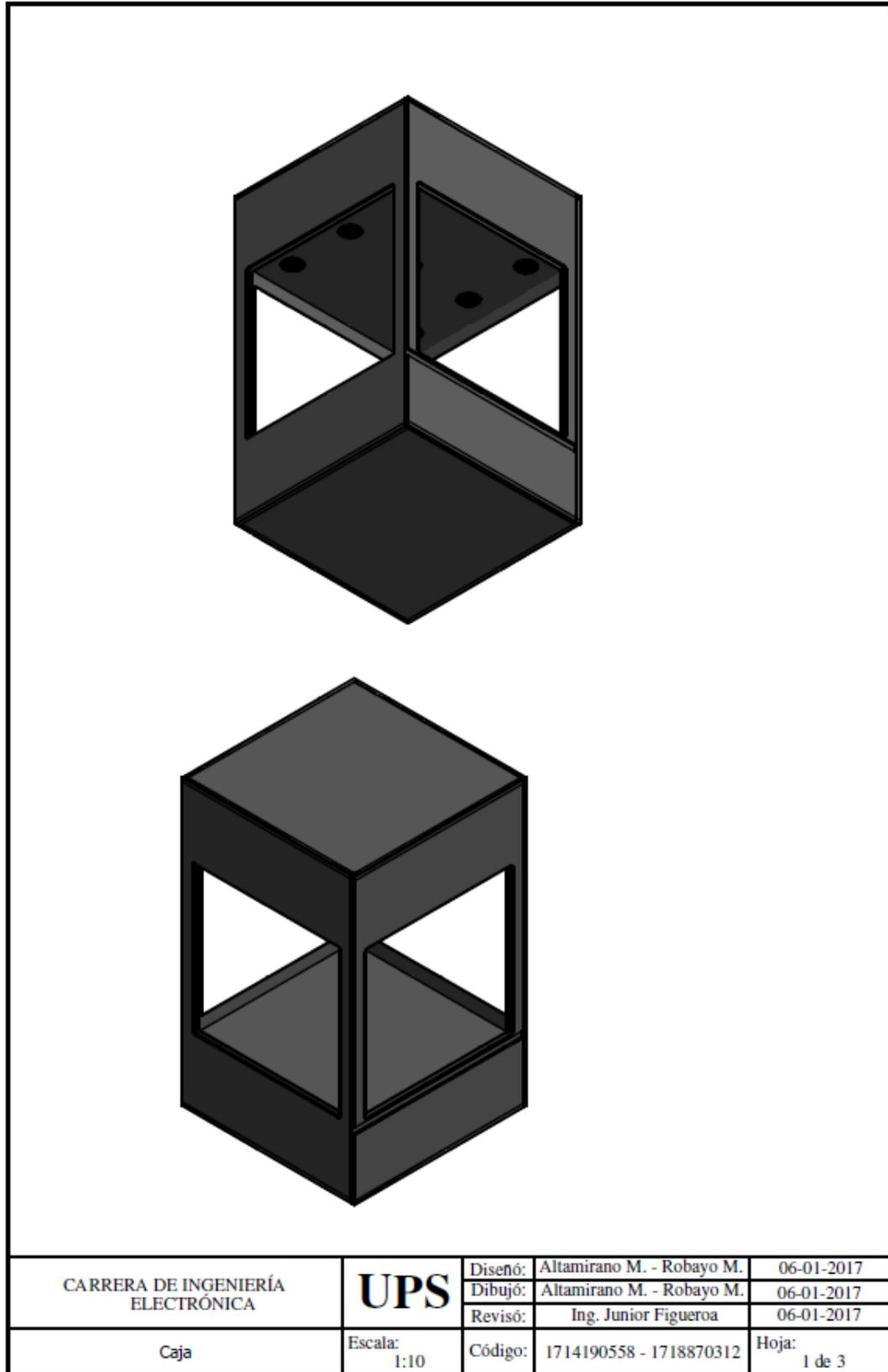


Anexo 6. Articulaciones tipo rótula y universal



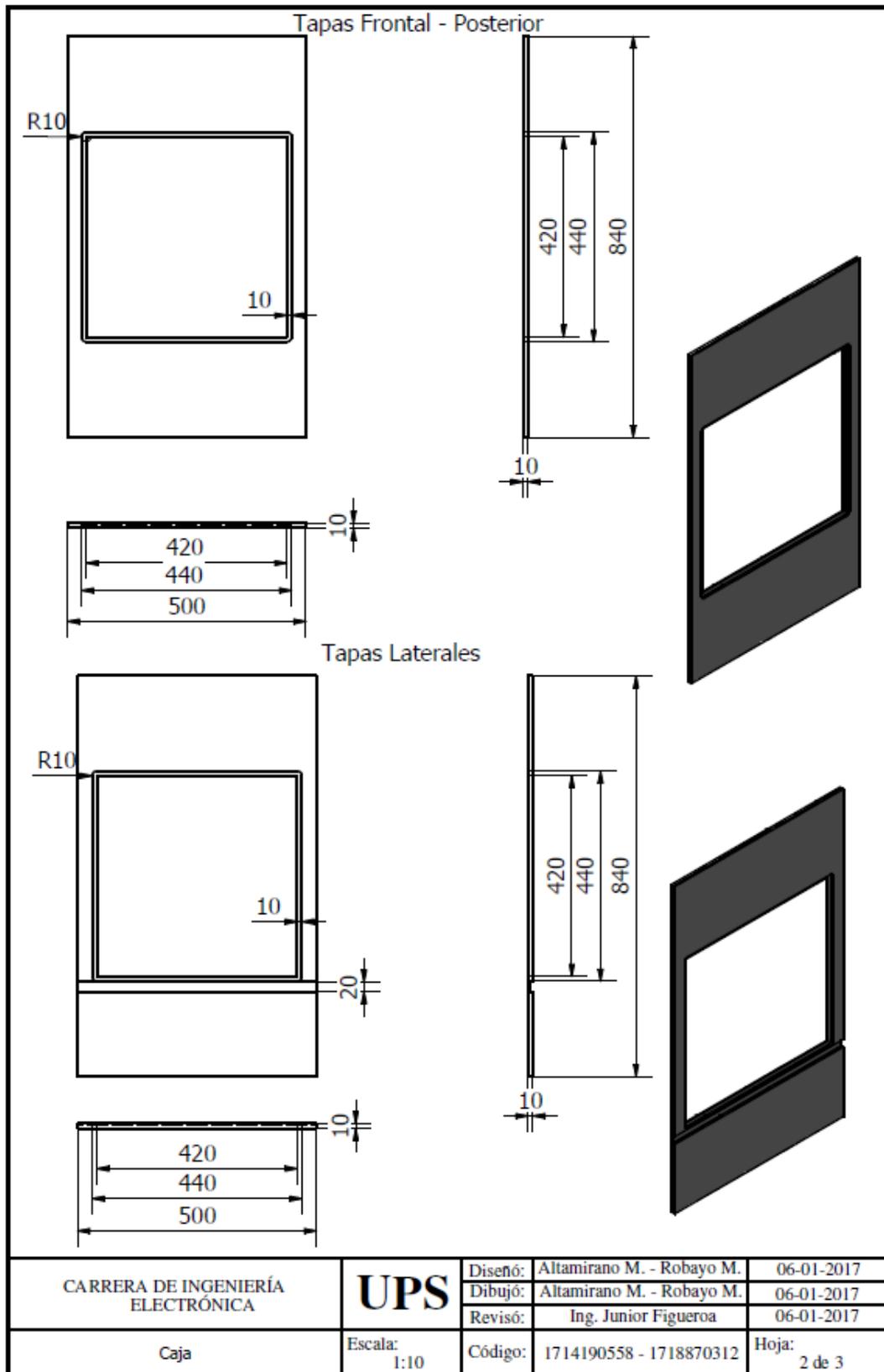
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	<b>UPS</b>	Diseño:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Dibujó:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Revisó:	Ing. Junior Figueroa	06-01-2017
Rótula - Universal	Escala: 1:1	Código:	1714190558 - 1718870312	Hoja: 1 de 1

Anexo 7. Estructura de madera que contiene a la plataforma SG

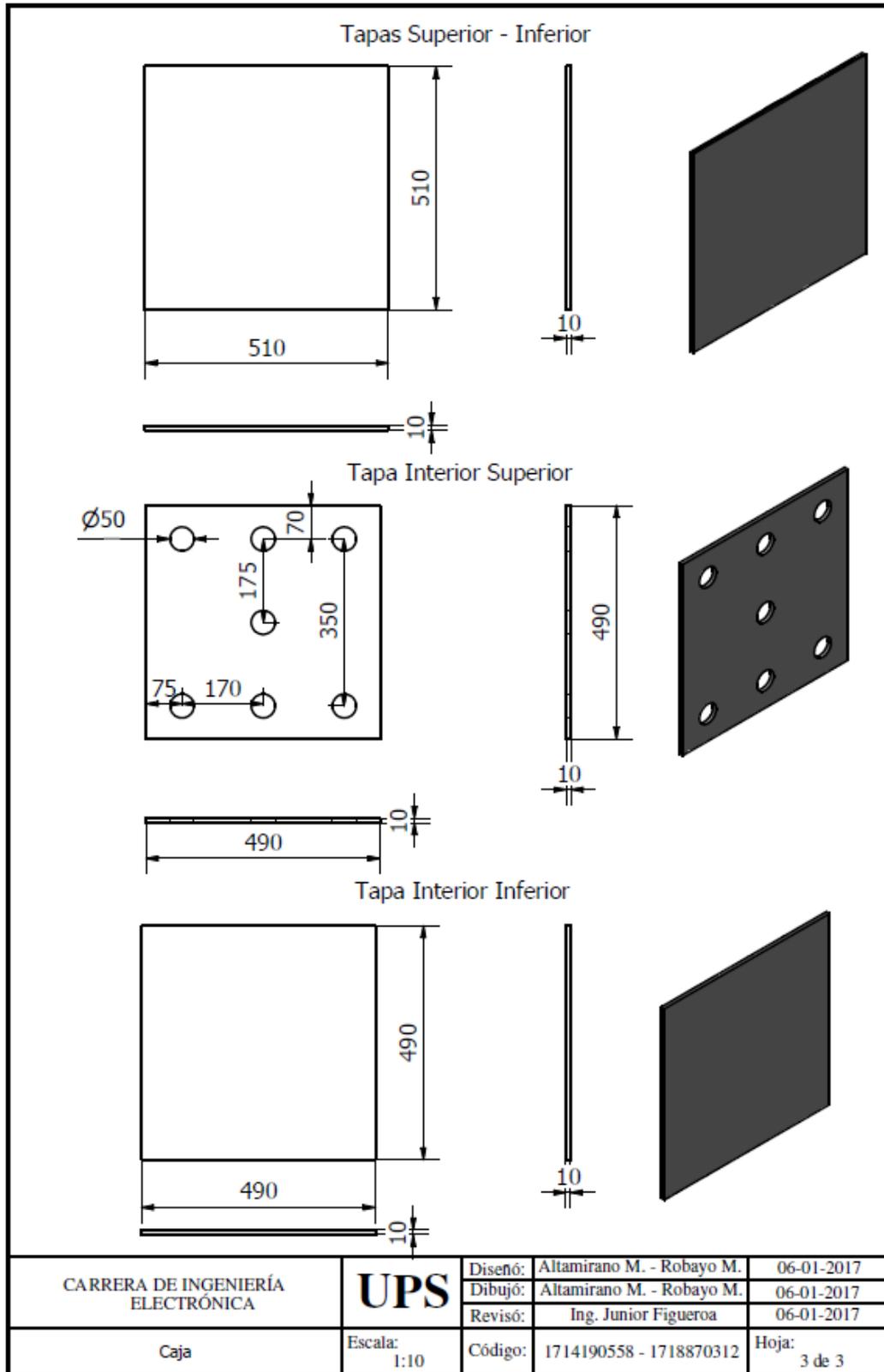


CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	<b>UPS</b>	Diseño:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Dibujó:	Altamirano M. - Robayo M.	06-01-2017
		Revisó:	Ing. Junior Figueroa	06-01-2017
Caja	Escala: 1:10	Código:	1714190558 - 1718870312	Hoja: 1 de 3

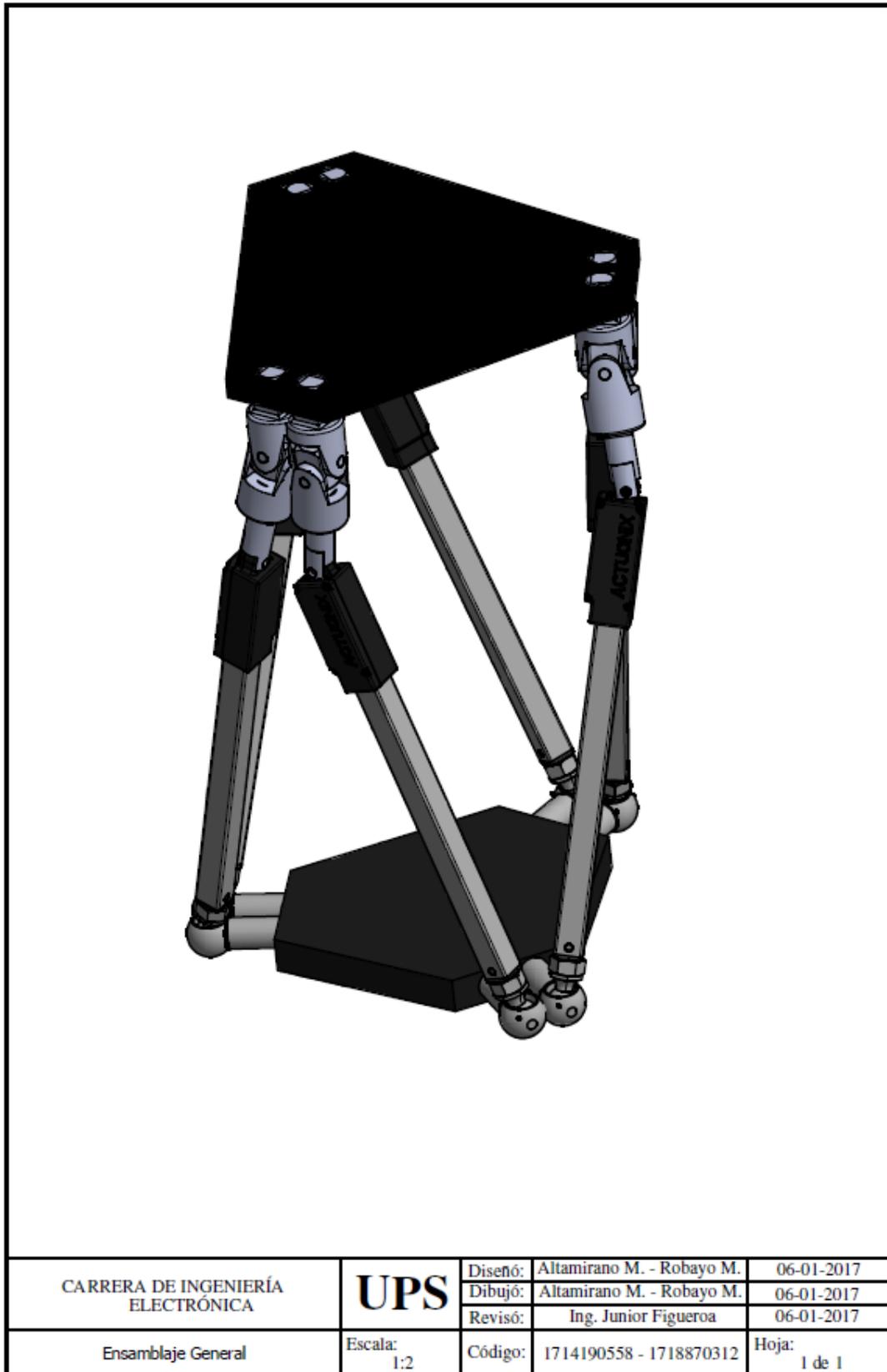
Anexo 8. Vista lateral de la estructura de madera que contiene a la plataforma SG



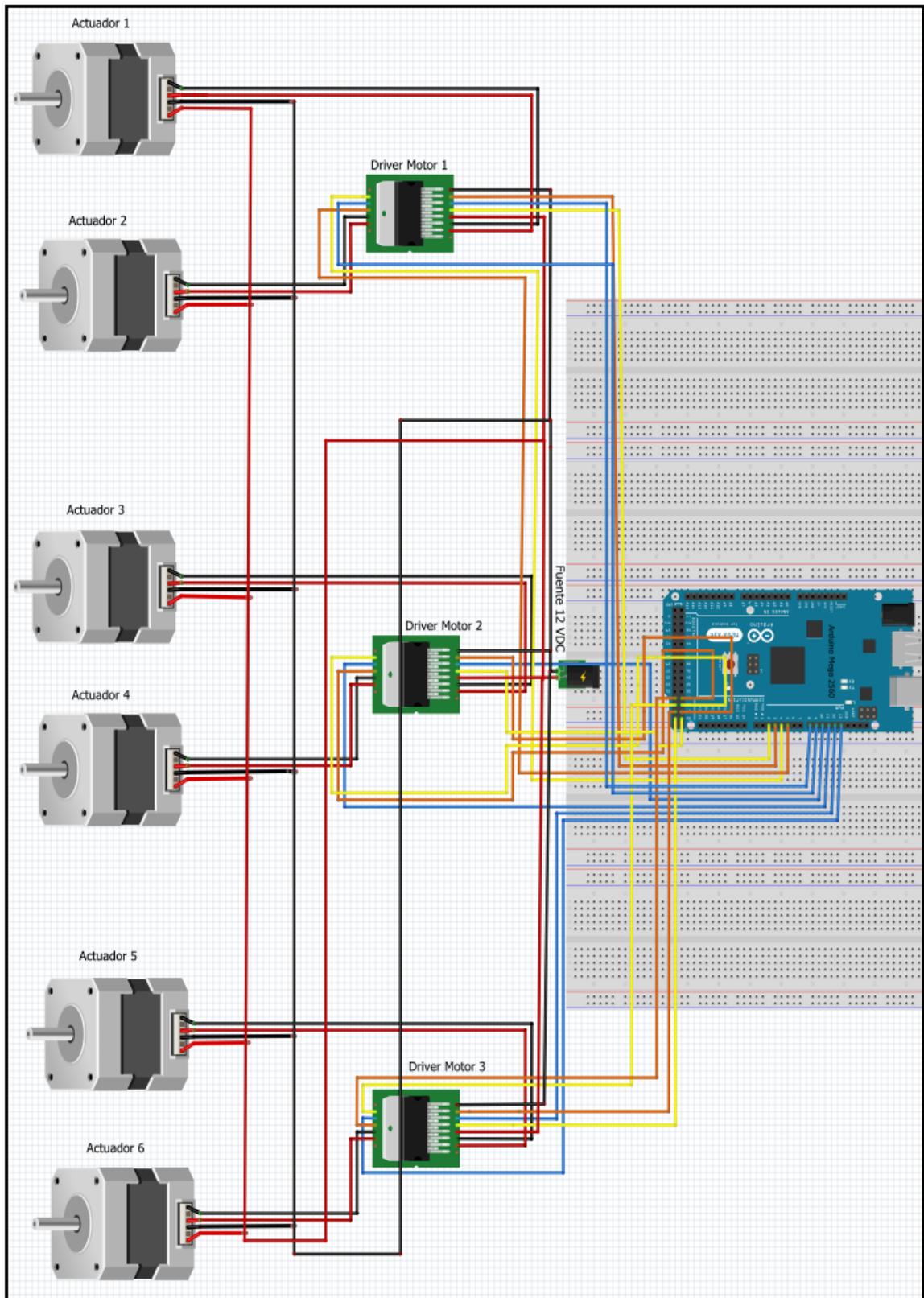
Anexo 9. Vistas superior e inferior de la estructura de madera que contiene a la plataforma SG



Anexo 10. Diseño de la implementación de la plataforma Stewart-Gough



# Anexo 11. Bloque de conexión de la placa de control de los actuadores lineales





### Anexo 13. Programacion de la plataforma Stewart-Gough (Ventana de Bienvenida)

```
function welcome_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% Añadir imagen en la interfaz con funcion imread

axes(handles.axes2);
im= imread('pst.JPG');
imshow(im);

axes(handles.axes1);
ima= imread('logo.JPG');
imshow(ima);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = welcome_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)

varargout{1} = handles.output;

% Conectar tarjeta Arduino con Matlab
% almacenado en caracter "a" y globalizado

clear all;
clc;

global a;
a = arduino;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% llamada de ventana control automatico "while_rob"
clear all; close all; clc; while_rob;

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% llamada de ventana control manual "framees"
clear all; close all; clc; framees;

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% menu para demostracion
b=get(handles.popupmenu1, 'Value')
switch b
    case 2
        % llamada demostracion 1
        rotate_robot;
    case 3
        % llamada demostracion 2
        rotate2_robot;
end
```

## Anexo 14. Programacion de la plataforma Stewart-Gough (Control Manual)

```
% --- Executes just before framees is made visible.
function framees_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
axes(handles.axes4);
ima= imread('DonBosco.JPG');
imshow(ima);

set(handles.text17, 'String', ' ');
set(handles.text41, 'String', '50');
axes(handles.axes1);
im= imread('st.JPG');
imshow(im);

% Choose default command line output for framees
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = framees_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;

clear all;
clc;

global a;
a = arduino;
% Seteo de velocidad al 50 porciento
writePWMDutyCycle(a, 'D8', 0.5);
writePWMDutyCycle(a, 'D9', 0.5);
writePWMDutyCycle(a, 'D10', 0.5);
writePWMDutyCycle(a, 'D11', 0.5);
writePWMDutyCycle(a, 'D12', 0.5);
writePWMDutyCycle(a, 'D13', 0.5);

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Actuadores lineales inactivos
writeDigitalPin(a, 'D8', 0);
writeDigitalPin(a, 'D9', 0);
writeDigitalPin(a, 'D10', 0);
writeDigitalPin(a, 'D11', 0);
writeDigitalPin(a, 'D12', 0);
writeDigitalPin(a, 'D13', 0);

% Llamado de la ventana "welcome"
clear all ; close all;clc;
welcome;
```

```

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a;
writeDigitalPin(a, 'D3',0)
writeDigitalPin(a, 'D5',0)
set(handles.pushbutton5, 'BackgroundColor', 'g');

% Seteo de distancia máxima de 3 Voltios en Motor 1 y 2
% almacenado en vector "p"

p= [a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1')];
if p > 3
    disp('maxima distancia M1 y M2')
    set(handles.text48, 'String', 'maxima distancia M1 y M2');
    writeDigitalPin(a, 'D2',0)
    writeDigitalPin(a, 'D4',0)
disp(p)
else

    writeDigitalPin(a, 'D2',1); writeDigitalPin(a, 'D4',1);
    pause(0.20)
    writeDigitalPin(a, 'D2',0); writeDigitalPin(a, 'D4',0);

end

% Lectura de voltajes en Motor 1 y 2; comando "readVoltage"
% Visualizacion en interfaz control manual "set(handles.text)"

Av0=readVoltage(a, 'A0'); Ar0=readVoltage(a, 'A0'); Arr0=Ar0*1023/5;
Av1=readVoltage(a, 'A1'); Ar1=readVoltage(a, 'A1'); Arr1=Ar1*1023/5;
set(handles.text2, 'String', fix(Av0));
set(handles.text5, 'String', fix(Arr0));
set(handles.text3, 'String', fix(Av1));
set(handles.text6, 'String', fix(Arr1));
pause(0.4)

% Cambio de color al pulsar el boton 5
set(handles.pushbutton5, 'BackgroundColor', '0.94,0.94,0.94')
% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
writeDigitalPin(a, 'D2',0)
writeDigitalPin(a, 'D4',0)

% Cambio de color al pulsar el boton 6
set(handles.pushbutton6, 'BackgroundColor', 'y');
writeDigitalPin(a, 'D3',1)

```

```

writeDigitalPin(a, 'D5',1)
    pause (0.20)
writeDigitalPin(a, 'D3',0)
writeDigitalPin(a, 'D5',0)

Av0=readVoltage(a, 'A0'); Ar0=readVoltage(a, 'A0'); Arr0=Ar0*1023/5;
Av1=readVoltage(a, 'A1'); Ar1=readVoltage(a, 'A1'); Arr1=Ar1*1023/5;
set(handles.text2, 'String', fix(Av0));
set(handles.text5, 'String', fix(Arr0));
set(handles.text3, 'String', fix(Av1));
set(handles.text6, 'String', fix(Arr1));
pause(0.4)
set(handles.pushbutton6, 'BackgroundColor', '0.94,0.94,0.94')

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

% Vector "x" almacena lectura de voltajes en matriz 1x6
% Vector "y" almacena Valores de la conversion A/D
global a;
x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')];
set(handles.text28, 'String',x);
y= (x*1023)/5;
set(handles.text37, 'String',y);
% Opcion del radiobutton para saber el valor de activacion
% comando "get(hObject,'Value')"
% Si K==0 pin 2 Arduino; apagado
% Si K==1 pin 2 Arduino; encendido por 5ms
k=get(hObject, 'Value');
if k==0
    writeDigitalPin(a, 'D2',0)
    set(handles.text28, 'String',x);
end
if k==1
    if a.readVoltage('A0')> 1.4
        writeDigitalPin(a, 'D2',0)
        set(handles.text28, 'String',x);
    else
        writeDigitalPin(a, 'D2',1)
        pause (0.05)
        writeDigitalPin(a, 'D2',0)
        set(handles.text28, 'String',x);
        set(handles.text37, 'String',y);
    end
end
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
writeDigitalPin(a, 'D22',0)
writeDigitalPin(a, 'D26',0)
set(handles.pushbutton8, 'BackgroundColor', 'y');
% set(handles.pushbutton8, 'String', 'DOWN')
writeDigitalPin(a, 'D24',1)
writeDigitalPin(a, 'D28',1)
    pause (0.20)
writeDigitalPin(a, 'D24',0)
writeDigitalPin(a, 'D28',0)

Av0=readVoltage(a, 'A2'); Ar0=readVoltage(a, 'A2'); Arr0=Ar0*1023/5;
Av1=readVoltage(a, 'A3'); Ar1=readVoltage(a, 'A3'); Arr1=Ar1*1023/5;
set(handles.text9, 'String', fix(Av0));
set(handles.text11, 'String', fix(Arr0));
set(handles.text10, 'String', fix(Av1));
set(handles.text12, 'String', fix(Arr1));
pause(0.4)
set(handles.pushbutton8, 'BackgroundColor', '0.94,0.94,0.94')

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
writeDigitalPin(a, 'D25',0)
writeDigitalPin(a, 'D29',0)
set(handles.pushbutton9, 'BackgroundColor', 'g');
p= [a.readVoltage('A4'), a.readVoltage('A5')];

    if p > 3
        disp('maxima distancia M5 y M6')
        set(handles.text48, 'String', 'maxima distancia M5 y M6');
        writeDigitalPin(a, 'D23',0)
        writeDigitalPin(a, 'D27',0)
    disp(p)
    else

%         set(handles.pushbutton9, 'String', 'UP')
        writeDigitalPin(a, 'D23',1); writeDigitalPin(a, 'D27',1);
        pause(0.20)
        writeDigitalPin(a, 'D23',0); writeDigitalPin(a, 'D27',0);
        pause(0.4)
set(handles.pushbutton9, 'BackgroundColor', '0.94,0.94,0.94')

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a;
x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
y= (x*1023)/5;
set(handles.text28, 'String',x);
set(handles.text37, 'String',y);
% Boton para regresar a posicion inicial
% lee Valores de voltaje en los actuadores lineales
% Si el voltaje en todos los actuadores es menor a 1V no regresan
if x >= 0
    disp('HOMe')
writeDigitalPin(a, 'D7',0);
writeDigitalPin(a, 'D3',1);
writeDigitalPin(a, 'D5',1);
writeDigitalPin(a, 'D24',1);
writeDigitalPin(a, 'D28',1);
writeDigitalPin(a, 'D25',1);
writeDigitalPin(a, 'D29',1);
    x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
    if x < 1
        disp('stop finish')
writeDigitalPin(a, 'D7',1);
writeDigitalPin(a, 'D3',0);
writeDigitalPin(a, 'D5',0);
writeDigitalPin(a, 'D24',0);
writeDigitalPin(a, 'D28',0);
writeDigitalPin(a, 'D25',0);
writeDigitalPin(a, 'D29',0);
        end
    end
x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
if x < 1
    disp('stop')
writeDigitalPin(a, 'D7',1);
writeDigitalPin(a, 'D3',0);
writeDigitalPin(a, 'D5',0);
writeDigitalPin(a, 'D24',0);
writeDigitalPin(a, 'D28',0);
writeDigitalPin(a, 'D25',0);
writeDigitalPin(a, 'D29',0);
x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
y= (x*1023)/5;
set(handles.text28, 'String',x);
set(handles.text37, 'String',y);

```

## Anexo 15. Programacion de la plataforma Stewart-Gough (Control Automático)

```
% --- Executes just before while_rob is made visible.
function while_rob_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes while_rob wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
set(handles.togglebutton1, 'String', 'INICIO');
axes(handles.axes1);
im= imread('base_sup.PNG');
imshow(im);

axes(handles.axes2);
ima= imread('DonBosco.JPG');
imshow(ima);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = while_rob_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject     handle to figure
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

clear all;
%close all;
clc;
% comandos activation de la web camara
% global cam;
% %axes(handles.axes2);
% cam=webcam(1);
% cam.Resolution='320x240';
% preview(cam);

global a;
a = arduino;
% seteo inicial de velocidad al 80 porciento

writePWMDutyCycle(a, 'D8', 0.8);
writePWMDutyCycle(a, 'D9', 0.8);
writePWMDutyCycle(a, 'D10', 0.8);
writePWMDutyCycle(a, 'D11', 0.8);
writePWMDutyCycle(a, 'D12', 0.8);
writePWMDutyCycle(a, 'D13', 0.8);
```

```

% --- Executes on button press in togglebutton1.
function togglebutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global a;
if get(hObject,'Value')== 0
    writeDigitalPin(a,'D7',0);
    set(handles.togglebutton1,'String','INICIAR');
    set(handles.togglebutton1,'BackgroundColor','0.94,0.94,0.94');
end

while get(hObject,'Value')
    writeDigitalPin(a,'D7',1);
    set(handles.togglebutton1,'BackgroundColor','y');
    set(handles.togglebutton1,'String','DETENER');
    % lectura de voltajes en actuadores "x"
    % lectura de voltajes en paneles "r"

    x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
    r= [ a.readVoltage('A8'), a.readVoltage('A9'),
a.readVoltage('A10')]
    pause(500/1000)
    set(handles.text2,'String',num2str(r));

    % Condicion para bajar actuadores al no detector luz
    if ((r(1,1)< 2) || (r(1,2)< 2) || (r(1,3)< 2)) && ((x(1,1)> 2) ||
(x(1,2)> 2) ||(x(1,3)> 2)&& (x(1,4)> 2) || (x(1,5)> 2) || (x(1,6)>
2))
        disp('bajar')

writeDigitalPin(a,'D3',1);
writeDigitalPin(a,'D5',1);
writeDigitalPin(a,'D24',1);
writeDigitalPin(a,'D28',1);
writeDigitalPin(a,'D25',1);
writeDigitalPin(a,'D29',1);

x= [ a.readVoltage('A0'), a.readVoltage('A1'),
a.readVoltage('A2'), a.readVoltage('A3'), a.readVoltage('A4'),
a.readVoltage('A5')]
    if x < 1
        disp('stop finish')
writeDigitalPin(a,'D3',0);
writeDigitalPin(a,'D5',0);
writeDigitalPin(a,'D24',0);
writeDigitalPin(a,'D28',0);
writeDigitalPin(a,'D25',0);
writeDigitalPin(a,'D29',0);
    end

end

```

```

% Condicion todos los actuadores suben
% Voltajes en paneles entre 2,5 V
if ( r(1,1)>=2 && r(1,1)<=3.6 ) && ( r(1,2)>=1 && r(1,2)<=2.8
)&& ( r(1,3)>=2.20 && r(1,3)<=3.3 )
    disp('all up')
    c=fix(clock)
cd=[c(1,4),c(1,5),c(1,6)]
cf=[c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
set(handles.text4,'String',num2str(cf));
set(handles.text3,'String',num2str(cd));
set(handles.text8,'String','1,2,3');
cddu=[c(1,4),c(1,5),c(1,6),c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
xlswrite('repo.xls',cddu,'sensor_1_2_3','a1')

f= [1 1 1 1 1 1]

writeDigitalPin(a,'D2',f(1,1));
writeDigitalPin(a,'D4',f(1,2));
writeDigitalPin(a,'D22',f(1,3));
writeDigitalPin(a,'D26',f(1,4));
writeDigitalPin(a,'D23',f(1,5));
writeDigitalPin(a,'D27',f(1,6));

pause(80/1000)

writeDigitalPin(a,'D2',0);
writeDigitalPin(a,'D4',0);
writeDigitalPin(a,'D22',0);
writeDigitalPin(a,'D26',0);
writeDigitalPin(a,'D23',0);
writeDigitalPin(a,'D27',0);

end

if (r(1,1)< 1.4) && (x(1,1) > 0.5) && (x(1,5) > 0.5) && (x(1,2) >
0.5) && (x(1,6) > 0.5)

ff= [1 1 0 0 1 1]
writeDigitalPin(a,'D3',ff(1,1));
writeDigitalPin(a,'D5',ff(1,2));
writeDigitalPin(a,'D24',ff(1,3));
writeDigitalPin(a,'D28',ff(1,4));
writeDigitalPin(a,'D25',ff(1,5));
writeDigitalPin(a,'D29',ff(1,6));

```

```

%s3,s1>s2 panel3 y panel1 mayores que panel2
if (r(1,3)> 2) && (r(1,1)> 2) %&&& (r(1,2)< 2)
    %&&& (r(1,1)<2.5) && (r(1,2)<2.5)
c=fix(clock)
cd=[c(1,4),c(1,5),c(1,6)]
cf=[c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
set(handles.text4,'String',num2str(cf));
set(handles.text3,'String',num2str(cd));
set(handles.text8,'String','3,1');
cddt=[c(1,4),c(1,5),c(1,6),c(1,3),c(1,2),c(1,1)]
xlswrite('repo.xls',cddt,'sensor_3_1','a1')

    f= [0 0 0 0 1 1]

writeDigitalPin(a,'D2',f(1,1));
writeDigitalPin(a,'D4',f(1,2));
writeDigitalPin(a,'D22',f(1,3));
writeDigitalPin(a,'D26',f(1,4));
writeDigitalPin(a,'D23',f(1,5));
writeDigitalPin(a,'D27',f(1,6));

pause(50/1000)

writeDigitalPin(a,'D2',0);
writeDigitalPin(a,'D4',0);
writeDigitalPin(a,'D22',0);
writeDigitalPin(a,'D26',0);
writeDigitalPin(a,'D23',0);
writeDigitalPin(a,'D27',0);
end

if (r(1,1)< 1.5) && (r(1,3)< 1.5) && (x(1,5) > 0.5) && (x(1,6) >
0.5)

ff= [0 0 0 0 1 1]
writeDigitalPin(a,'D3',ff(1,1));
writeDigitalPin(a,'D5',ff(1,2));
writeDigitalPin(a,'D24',ff(1,3));
writeDigitalPin(a,'D28',ff(1,4));
writeDigitalPin(a,'D25',ff(1,5));
writeDigitalPin(a,'D29',ff(1,6));
if x < 1
writeDigitalPin(a,'D3',0);
writeDigitalPin(a,'D5',0);
writeDigitalPin(a,'D24',0);
writeDigitalPin(a,'D28',0);
writeDigitalPin(a,'D25',0);
writeDigitalPin(a,'D29',0);
end

```