

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA

**SEP**

**TRABAJO PROFESIONAL**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:**

# **INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**QUE PRESENTA:**

**PAOLA MARGARITA DÍAZ JUÁREZ**

**CON EL TEMA:**

**“Robot escalador de superficies verticales”**

**MEDIANTE:**

**OPCIÓN I**

**(TESIS)**

## *Agradecimientos*

*A Dios, por ponerme en el lugar indicado y que me ha demostrado durante toda la vida que no estoy sola.*

*A mis padres, Cutberto y Carmen, por siempre respetar y apoyar mis decisiones, sin ustedes no sería la persona que soy ahora.*

*A mi mamá, mi gran amiga, ya que gracias a su cariño y amor, cada día me hace una mejor persona. A mi papa, por ser siempre un gran ejemplo a seguir y a su particular forma de brindarme amor.*

*A mi hermano Julio, la distancia no fue un obstáculo para que me brindaras tu apoyo incondicional, gracias a Daniela y a ti, por darme dos bellos motivos para seguir esforzándome en la vida.*

*A mi hermano Marco, por ser el ángel de mi guarda, el que me cuida y protege desde el cielo.*

*A mis maestros, los cuales me guiaron para culminar con éxito mi carrera.*

*Al Dr. Eduardo Castillo y M.C. Yamile Sandoval, por brindarme la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo.*

*A José y Hugo, por su gran amistad, que me permitieron acompañarlos durante este largo trayecto.*

*A mis hermanas, Gina y Ale, por siempre estar cuando las necesite y compartir conmigo momentos de felicidad.*

*A él, esa persona que fue mi inspiración y recompensa durante toda mi carrera profesional.*

# Índice

Índice de figuras .....	4
Índice de tablas.....	7
Índice de ecuaciones.....	8
Resumen .....	9
Capítulo I. Introducción general.....	10
1.1. Introducción .....	10
1.2. Problemática .....	12
1.3. Hipótesis .....	12
1.4. Objetivos .....	13
1.5. Justificación.....	13
1.6. Alcances y límites .....	14
Capítulo II. Marco teórico.....	15
2.1. Robots .....	15
2.1.1. Clasificación robots móviles .....	16
2.2 Servomotor .....	19
2.3. PLC.....	20
2.4. Neumática.....	21
2.5. Vacío .....	22
2.6. Generador de vacío .....	22
2.7. Ventosas .....	23
2.8. Cinemática directa.....	25
2.8.1 Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemática directa... 27	
2.9. Métodos de calibración de cámaras.....	28
2.9.1. Modelo matemático de una cámara (Pinhole).....	32
2.9.2. Toolbox de Matlab para la calibración de las cámaras (Zhang) .....	35
Capítulo III. Diagnóstico del robot .....	38
3.1 King Spider .....	38
3.1.1. USBDynamixel.....	39
3.1.2 Servomotores AX-12.....	40
3.1.3. Software de programación del Robot. ....	41

3.2. Sistema de succión .....	43
3.2.1. Generador de vacío .....	44
3.3. Sistema neumático.....	44
Capítulo IV. Desarrollo de la investigación .....	46
4.1. Pruebas físicas con el sensor inclinómetro.....	46
4.2. Cámara 3D .....	49
4.3. Pruebas físicas con sensores de distancia.....	50
4.4. Implementación de sensores de distancia .....	52
4.5. Parámetros de Denavit-Hartenberg.....	54
4.6. Validación de la cinemática directa por medio de Calibración de Cámara.....	56
4.7. Locomoción del robot hexápodo.....	64
Capítulo V. Resultados.....	67
5.1. Resultados de la cinemática directa.....	67
5.1.1. Comparación de resultados.....	68
5.2. Simulación de la placa de instrumentación.....	71
5.3. Desarrollo del algoritmo de locomoción.....	73
Conclusiones.....	76
Bibliografía .....	77
Anexo A. CM-510.....	78
Anexo B. Servomotor AX-12 .....	79
Anexo C. CPX-CEC-C1.....	81
Anexo D. Generador de vacío.....	82
Anexo E. Ventosas de fuelle .....	82
Anexo F. Sensor de Distancia.....	83
Anexo G. Inclinómetro .....	87
Anexo H. Cámara estereoscópica.....	90
Anexo I. Código fuente.....	92

## ***Índice de figuras***

Figura 2.1. Configuración bilateral.....	18
Figura 2.2. Configuración radial.....	18
Figura 2.3. Duración del pulso .....	20
Figura 2.4. Diagrama Generador de Vacío.....	23
Figura 2.5. Ventosa estándar.....	24
Figura 2.6. Ventosa de fuelle .....	24
Figura 2.7. Ejemplo parámetros Denavit-Hartenberg .....	28
Figura 2.8. Grilla padrón de Calibración y sistema de referencia.....	29
Figura 2.9. Plantilla plana de calibración.....	31
Figura 2.10. Modelo Pinhole.....	34
Figura 2.11. Patrón de calibración en 10 poses diferentes.....	35
Figura 2.12. Detección del patrón.....	36
Figura 2.13. Vista del patrón.....	37
Figura 3.1. BIOLOID Kit King Spider.....	38
Figura 3.2. Control CM-510.....	38
Figura 3.3. Conexión CM-510.....	39
Figura 3.4. USBDynamixel.....	39
Figura 3.5. Control de servos Dynamixel usando PC .....	39
Figura 3.6. Control del robot con puerto serial.....	40
Figura 3.7. Servomotor AX-12.....	40
Figura 3.8. RoboPlus Motion.....	41
Figura 3.9. RoboPlus Task .....	42
Figura 3.10. RoboPlus Manager.....	42
Figura 3.11. Rediseño final.....	43
Figura 3.12. Sistema de succión para una extremidad.....	43
Figura 3.13. Generador de vacío.....	44
Figura 3.14. Ventosa VASB-55-1/4-SI.....	44
Figura 3.15. Diagrama sistema neumático.....	45
Figura 4.1. Sensor inclinómetro .....	46
Figura 4.2. Conexiones eléctricas CM-510.....	47

Figura 4.3. Prueba del inclinómetro.....	47
Figura 4.4. Encapsulado del inclinómetro.....	48
Figura 4.5. Cámara 3D.....	49
Figura 4.6. Montaje final de la cámara 3D.....	49
Figura 4.7. Sensor de fin de carrera.....	52
Figura 4.8. Diagrama procesamiento de la señal.....	53
Figura 4.9. Corte del ángulo.....	53
Figura 4.10. Ajuste del sensor.....	53
Figura 4.11. Implementación de los sensores en cada extremidad.....	53
Figura 4.12. Extremidad con tres articulaciones.....	54
Figura 4.13. Parámetros Denavit-Hartenberg.....	54
Figura 4.14. Cámara DfK-72AUC02.....	57
Figura 4.15. Dimensiones del patrón.....	57
Figura 4.16. Montaje de la cámara.....	58
Figura 4.17. Fotografías de calibración.....	58
Figura 4.18. Fotografías de la primera trayectoria.....	59
Figura 4.19. Detección de esquinas.....	60
Figura 4.20. Gráfica de error en la calibración.....	61
Figura 4.21. Proyección del patrón visto desde el marco de referencia de la cámara.....	61
Figura 4.22. Extracción de esquinas de las imágenes de las trayectorias.....	62
Figura 4.23. Enumeración de las extremidades.....	64
Figura 4.24. Polígono de estabilidad.....	65
Figura 4.25. Succión de aire de una extremidad.....	65
Figura 4.26. Succión de aire de la ventosa.....	66
Figura 5.1. Trayectorias calibración de cámara.....	70
Figura 5.2. Trayectorias cinemática directa.....	70
Figura 5.3. Montaje final del sensor.....	71
Figura 5.4. Simulación del circuito.....	71
Figura 5.5. Rutado final.....	72
Figura 5.6. Conexiones del circuito.....	72
Figura 5.7. Diagrama secuencia de pasos.....	73
Figura 5.8. Secuencia de pasos.....	74

Figura B.1. Circuito interno del controlador.....	79
Figura B.2 Asignación de puntas Servo Dynamixel.....	79
Figura B.3 Rango de ángulos Servomotor Dynamixel.....	80
Figura C.1. Diagrama de bloque de mando CPX-CEC-C1.....	81
Figura F.1 Sensor DMS.....	83
Figura F.2 Conexiones eléctricas DMS.....	84
Figura F.3 Graficas de respuesta de sensor DMS.....	84
Figura F.4. Sensor infrarrojo.....	85
Figura F.5. Conexiones eléctricas sensor infrarrojo.....	85
Figura F.6. Conexiones eléctricas sensor infrarrojo.....	86
Figura G.1. Sensor GP1S036HEZ.....	88
Figura G.2. Diagrama de conexión interna.....	88
Figura G.3. Gráfica de la Corriente y Temperatura.....	89
Figura G.4. Disipación de Potencia y Temperatura ambiente.....	89

## ***Índice de tablas***

Tabla 2.1. Parámetros de Denavit – Hartenberg .....	28
Tabla 4.1. Lecturas del sensor de distancia (DMS). .....	50
Tabla 4.2. Lecturas del sensor infrarrojo. ....	51
Tabla 4.3. Parámetros extrínsecos de la cámara. ....	60
Tabla 4.4. Parámetros extrínsecos de una imagen .....	62
Tabla 5.1. Resultados primer trayectoria.....	67
Tabla 5.2. Resultados segunda trayectoria. ....	67
Tabla 5.3. Resultados tercera trayectoria .....	68
Tabla 5.4. Tabla de resultados de la primera trayectoria.. ..	68
Tabla 5.5. Tabla de resultados de la segunda trayectoria. ....	69
Tabla 5.6. Tabla de resultados de la tercera trayectoria .....	69
Tabla A.1. Datos técnicos CM-510. ....	78
Tabla B.1. Datos técnicos AX-12. ....	80
Tabla D.1. Datos técnicos generador VN-05-N-13-PQ2-VQ2.....	82
Tabla E.1. Datos técnicos Ventosa VASB-55-1/4-SI.....	82
Tabla G.1. Tabla de detección de ángulos.....	89



## ***Índice de ecuaciones***

1. Producto de matrices de transformación .....	26
2. Desarrollo del producto de matrices .....	26
3. Coordenadas homogéneas .....	32
4. Matriz de traslación .....	32
5. Escalado .....	32
6. Rotación .....	33
7. Relación coordenadas en 2 y 3 dimensiones .....	34
8. Matriz de la cámara .....	34
9. Matriz de la cámara .....	55
10. Matriz de la cámara .....	55

## **Resumen**

En este trabajo se muestra el desarrollo de la locomoción e instrumentación de un robot hexápodo para fines de inspección en superficies verticales y la validación de su cinemática directa. Dicho prototipo es tema de tesis doctoral de la Maestra Xóchitl Yamile Sandoval Castro, con la que se estuvo colaborando en el Centro de Investigación de Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA).

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción de la importancia de la robótica en la vida diaria, así como la descripción del problema al que se enfrentó y los límites de la solución propuesta.

En el capítulo 2 encontramos conceptos y modelos matemáticos que nos ayudaran a desarrollar el objetivo de la tesis, dentro de este capítulo podemos encontrar conceptos como la clasificación de robots, la cinemática directa de un robot serial, adquisición y procesamiento de imágenes con una cámara, haciendo énfasis en el método de la calibración de la cámara para obtener sus parámetros intrínsecos y extrínsecos. Mientras que en el capítulo 3 se presentan las partes que conforman al robot hexápodo, el cual cuenta con 6 extremidades idénticas con tres grados de libertad en cada una y el sistema de neumática que utiliza.

En el capítulo 4 se explica el desarrollo del algoritmo de la locomoción, la instrumentación del robot, la descripción de la cinemática directa y la validación de la misma a través del método de calibración de cámara.

En el capítulo 5 consiste en el resultado final del algoritmo de locomoción y se muestran los resultados de la validación cinemática tanto teóricos como experimentales.

Se adjunta una conclusión acerca de los resultados obtenidos y algunas recomendaciones para el futuro desarrollo del proyecto. En el anexo A se encuentran especificaciones técnicas del prototipo y en el anexo B contiene todos los códigos que fueron utilizados a lo largo del trabajo.

# **Capítulo I. Introducción general**

## **1.1. Introducción**

La robótica es una tecnología, que surgió como tal aproximadamente hacia el año 1960, desde entonces ha transcurrido el tiempo y el interés que ha despertado es superior a cualquier previsión que en su nacimiento se pudiera formular, siguiendo un proceso paralelo a la introducción de las computadoras en las actividades cotidianas de la vida del hombre, aunque si bien todavía los robots no han encontrado la vía de penetración en los hogares, pero si son un elemento ya imprescindible en la mayoría de las industrias.

Se puede contemplar la robótica como una ciencia que aunque se han conseguido grandes avances todavía ofrece un amplio campo para el desarrollo y la innovación, es precisamente este aspecto el que motiva a muchos investigadores a seguir adelante planteando cada vez robots más evolucionados.

La robótica es una tecnología multidisciplinar, ya que hace uso de los recursos que le proporcionan otras ciencias afines, solamente hay que pensar que en el proceso de diseño y construcción de un robot intervienen muchos campos pertenecientes a otras ramas de la ciencia como: Mecánica, Electrónica, Informática, Automatización, entre otras.

Recientemente las investigaciones en robótica se enfocan hacia el desarrollo de máquinas caminantes, debido a que en algunas aplicaciones se requiere de una considerable movilidad, sobre todo cuando se tiene la necesidad de locomoción en terrenos irregulares. Los robots con patas permiten una coordinación de movimientos para aislar las irregularidades del terreno. Así mismo, se busca desarrollar máquinas que requieran poca intervención humana.

Es por eso que en algunos casos el proceso para el diseño de un robot (longitud de la pierna o pata, localización de la masa, tamaño y otros parámetros estructurales) ha sido delegado hacia la imitación de estructuras del ambiente natural, especialmente para máquinas caminantes donde las estructuras presentan poca simplicidad pero un amplio margen de adaptabilidad.

Por esta razón, algunos diseñadores de robots caminantes tratan de imitar las criaturas de la naturaleza que tienen múltiples patas, con lo que se trata de hacer una mejor aproximación a ellas. Las investigaciones de este campo buscan copiar la manera de como lo natural ha generado seres con mejores perspectivas, interesantes y prometedores para su imitación en algún o algunos puntos específicos de su proceso

natural de evolución. Si podemos imitar el motor para generar un ser caminante, entonces podemos encontrar soluciones prácticas para escenarios, donde la geometría de las patas es un aspecto crucial del diseño e influye fuertemente en la eficiencia del robot y con lo cual, se realiza un estudio de los puntos físicos importantes para el conocimiento de una locomoción real.

Algunas de las aplicaciones más interesantes de robots autónomos móviles son las que requieren una complejidad alta de la cinemática del robot. Ejemplos son la exploración de planetas remotos, la inspección de terreno áspero, áreas destruidas o contaminadas, etc. De cualquier modo, la complejidad en el diseño del robot requiere métodos de control específicos en su sistema.

En el Centro de Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada se realiza el estudio y desarrollo de un Robot Hexápodo capaz de realizar tareas de inspección en superficies verticales, con dicho proyecto se estuvo apoyando en la locomoción en superficies verticales y la validación de su cinemática directa.

En este trabajo se presentan los conceptos fundamentales para el desarrollo de este proyecto, al igual que la locomoción de un robot caminante de seis patas escalador de superficies verticales, también el desarrollo y validación de la cinemática directa de una extremidad, en lo que respecta a la locomoción se requiere lograr el equilibrio en el robot, y tener un control óptimo del mismo en su marcha.

## **1.2. Problemática**

En el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) se está desarrollando un robot móvil con seis extremidades para realizar tareas de inspección en superficies verticales como parte de una Tesis de Doctorado, sin embargo es necesario lograr que el robot hexápodo camine sobre superficies verticales a través de un sistema de succión, además se necesita conocer y validar la cinemática directa de una extremidad del robot serial.

## **1.3. Hipótesis**

Es posible diseñar un sistema de locomoción para un robot de 6 extremidades para superficies verticales basado en un sistema de succión, la cinemática directa de una de las extremidades del robot será posible validarla ya que se cuentan con diferentes métodos.

## 1.4. Objetivos

### Objetivos generales

- Diseñar un algoritmo de locomoción para superficies verticales en un robot hexápodo.
- Validar la cinemática directa de una extremidad.

### Objetivos específicos

- Instrumentar el robot hexápodo para retroalimentar el algoritmo de locomoción.
- Sincronización de la locomoción del robot hexápodo con el sistema de succión controlado por el PLC.
- Validación del algoritmo de locomoción.

## 1.5. Justificación

Las ventajas de la sustitución humana por el robot son inmensas e infinitas, ya que sin esta el ser humano no hubiera sido capaz de evolucionar. Gracias a la robótica el ser humano ha podido dedicar su tiempo a mejorar la calidad de vida al aplicarla constantemente. En la actualidad existen muchas tareas peligrosas para los humanos, en México no se cuentan con sistemas móviles capaces de realizar inspecciones en ambientes peligrosos, por tal motivo, en este proyecto se enfoca a desarrollar un robot móvil de exploración para la ejecución de tareas en situaciones peligrosas, tales como la inspección de superficies verticales, con esto se pretende visualizar estructuras para detectar y analizar grietas en puentes y edificios, en la cual el robot sea capaz de recolectar información importante y necesaria de las grietas a partir de la toma de fotografías con una cámara estéreo, para así ahorrar tiempo, reducir costos y lo más importante evitar pérdidas humanas.

Un robot hexápodo tiene mayor movilidad y capacidad que cualquier otro modelo, ya que cada extremidad cuenta con tres grados de libertad, eso permite tener la capacidad de ajustarse a cualquier tipo de terreno, y al convertirlo en escalador se consiguen muchas aplicaciones, como son en el área de la seguridad industrial, por su tamaño

puede entrar en cualquier ducto. Con esta configuración no se tiene problemas para escalar cualquier tipo de superficie.

Desarrollar este tipo de tecnología en nuestro país, no solo resulta benéfico para la investigación, sino que también es de gran utilidad para diversos sectores, lamentablemente en México se compra la tecnología extranjera, la cual trae consecuencias para el país como su costo elevado y el rezago del desarrollo científico, por lo tanto con la investigación e implementación de los robots móviles se disminuirían los costos y las pérdidas humanas que actualmente se tienen y así incrementar el interés por la investigación.

## **1.6. Alcances y límites**

Alcances:

El robot sea capaz de desplazarse en superficies verticales.

Límites:

- El peso del robot no puede sobrepasar más de 3 kg, porque los servomotores se bloquearán y no permitirá el avance del mismo.
- La distancia para escalar superficies verticales está limitada a la longitud de las mangueras y cables de conexión.
- El robot hexápodo partió de un robot comercial de la compañía ROBOTIS, para el control del robot se manejan los siguientes compiladores, RoboPlus Motion, RoboPlus Task, los compiladores anteriores están muy limitados en la programación, por lo cual no se puede tener un control óptimo para el robot.

## **Capítulo II. Marco teórico**

En este capítulo se muestran los conceptos y herramientas necesarios para la realización del proyecto. Por lo tanto se muestra una breve descripción de los temas que se utilizaron y por otro lado se describe el modelo matemático de la cámara, así como la descripción del Toolbox de Matlab para la calibración de las cámaras por medio del algoritmo de Zhang.

### **2.1. Robot**

Un robot es una máquina capaz de realizar movimientos en función de la información captada por sus sensores. En este sentido, un robot no sería más que un sistema de control donde la acción controlada es su movimiento. Un robot se puede ver como un sistema de control lazo cerrado que puede realizar un cambio de posición de sus elementos (movimientos) en función de la información captada de su entorno mediante sus sensores. Los primeros robots surgen por la necesidad de tener que realizar trabajos industriales de forma eficiente, de manera rápida, segura y con el menor esfuerzo posible. Actualmente el 90% de los robots son robots industriales.

Sin embargo, también existen otras clases de robots. A continuación se revisarán todos los tipos de robots existentes, y sus aplicaciones:

- Robots industriales.

Los robots industriales se utilizan típicamente en fábricas e industrias para la realización de productos en serie, de calidad y de manera económica (por ejemplo, en fábricas de automóviles). Los robots industriales suelen ser brazos robóticos poli-articulados y sedentarios (no se desplazan), diseñados para moverse en su espacio de trabajo. Son robots capaces de repetir continuamente movimientos con gran precisión y eficiencia (soldar, pintar, recoger material, limpiar, pulir, etc.). Además se trata de máquinas muy flexibles, ya que pueden cambiar su forma de operar si cambia el producto que fabrican.



- Androides.

Son robots que intentan asemejarse a los seres humanos. Su función es puramente experimental y divulgativa, y sólo se suelen ver en ferias y exposiciones. En la actualidad están muy poco desarrollados y su funcionalidad es muy limitada.

- Robots para aplicaciones médicas.

Son las prótesis robóticas, y los recientes robots de asistencia en quirófano (como el robot cirujano Da Vinci).

- Robots móviles.

Se trata de robots con gran capacidad de desplazamiento, acoplados sobre sistemas de propulsión (carros o plataformas móviles). Se desplazan sobre ruedas, orugas o patas, y son controlados por medio de un mando a distancia, o de forma autónoma utilizando la información captada por sus sensores. Se usan para suministro de material, transporte de mercancía peligrosa, construcción de túneles, reparaciones de oleoductos, despliegue de cables submarinos, misiones de exploración (espacial, submarina), artificieros, realización de tareas domésticas, etc. Los robots móviles terrestres poseen diversas aplicaciones en la industria, tales como la inspección y control de producción a distancia. Poseen diversas aplicaciones en la minería, y en el transporte en general. También, en el contexto de robots de servicio, los robots móviles se han introducido recientemente en el hogar.

### **2.1.1. Clasificación robots móviles**

Se pueden clasificar según el tipo de medio que usan para movilizarse.

- Robots móviles con ruedas

Las ruedas del robot móvil se mueven por el contacto superficial (o fricción) con la superficie, idealmente, se desplaza  $2\pi r$  por vuelta. Es uno de los menos complicados sistemas de locomoción. El robot puede ir recto, girar sobre sí mismo y trazar curvas. Un problema importante es como resolver el equilibrio del robot, ya que se necesita encontrar un apoyo adicional a las dos ruedas ya existentes. Los vehículos de ruedas son, con mucho, los más populares por varias razones prácticas, son más sencillos y más fáciles de construir, la carga que pueden transportar es mayor que la que puede soportar otros tipos de robots móviles. A esto se puede añadir el que se pueden utilizar

vehículos de ruedas de radio control para usarlos como bases de robots. La principal desventaja de las ruedas es su empleo en terreno irregular, en el que tienen un comportamiento no óptimo. Normalmente un vehículo de ruedas podrá sobrepasar un obstáculo que tenga una altura no superior al radio de sus ruedas.

- Robots con orugas

Las orugas son cadenas o bandas que permiten tracción sobre terrenos difíciles, tienen un desempeño pobre en localización.

- Robots con patas

A diferencia de los robots móviles, estos robots en lugar de utilizar ruedas utilizan patas. El problema principal es la estabilidad, lo que implica una mayor complejidad en su control, tienen un mayor consumo de energía ya que tienen que oponerse a la fuerza de gravedad. Pueden moverse por cualquier terreno que un ser humano pueda, cuentan con un mayor número de grados de libertad. Según el número de patas del robot, se pueden denominar cuadrúpedos, hexápodos, octópodos.

Potencialmente los robots con patas pueden superar, con mayor facilidad que los otros, los problemas de los terrenos irregulares. Dentro de los robots con patas existe una clasificación de los mismos, dependiendo del número de patas se pueden encontrar:

- De una sola pata
- Bípedos
- Cuadrúpedos
- Hexápodos
- Octópodos

Los robots hexápodos tienen una mayor estabilidad que en un robot cuadrúpedo por un motivo más sencillo: hay más patas libres para reposicionar el cuerpo del robot mientras este se apoya en tres de ellas, dentro de la configuración del robot hexápodo surgen de forma natural dos distribuciones de las patas alrededor del cuerpo del robot.

La primera de ellas, la denominada bilateral. Esta distribución presenta una simetría a lo largo del eje longitudinal del robot como se muestra en la Figura 2.1. Tiene la ventaja de una mayor simplicidad a la hora de programar los movimientos, debido a que el robot está preparado físicamente para facilitar el avance en direcciones paralelas al eje de simetría.

El inconveniente fundamental es que el sistema ofrece una mayor limitación en el movimiento en otras direcciones. Esto se soluciona implantando un giro para cambiar de orientación, pero complica más el software.

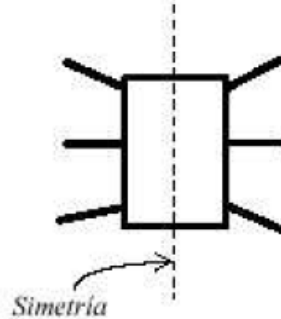


Figura 2.1. Configuración bilateral. [2]

La distribución radial no sufre el problema anterior, puesto que cualquier dirección es exactamente igual a cualquier otra, como se muestra en la Figura 2.2. En dos dimensiones, esta distribución es totalmente simétrica, y eso lleva a un software más genérico y más simple. No necesita movimientos específicos de giro puesto que es capaz de desplazarse en cualquier dirección sin tener previamente que cambiar de orientación (el robot es omnidireccional), aunque este tipo de movimiento puede implantarse para casos específicos. [6]

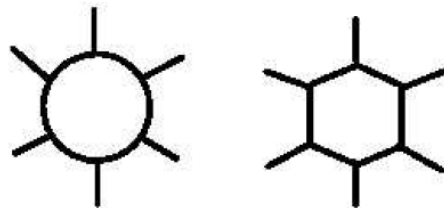


Figura 2.2. Configuración radial. [2]

## 2.2 Servomotor

Un Servo es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, títeres, y por supuesto, en robots.

Los Servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños, tiene internamente una circuitería de control interna y es sumamente poderoso para su tamaño.

El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro (una resistencia variable) esta es conectada al eje central del servo motor. El potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito verifica que el ángulo no es el correcto, el motor girará en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados. Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante. Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

El cable de control se usa para comunicar el ángulo. El ángulo está determinado por la duración de un pulso que se aplica al alambre de control. A esto se le llama PCM Modulación codificada de Pulsos. El servo espera ver un pulso cada 20 milisegundos (.02 segundos). La longitud del pulso determinará los giros de motor. Un pulso de 1.5 ms., por ejemplo, hará que el motor se torne a la posición de 90 grados (llamado la posición neutra). Si el pulso es menor de 1.5 ms., entonces el motor se acercará a los 0 grados. Si el pulso es mayor de 1.5ms, el eje se acercará a los 180 grados.

Como se observa en la figura 2.3, la duración del pulso indica o dictamina el ángulo del eje (mostrado como un círculo verde con flecha). [4]

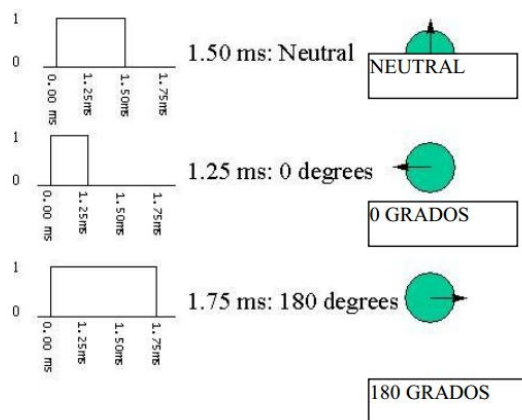


Figura 2.3. Duración del pulso. [4]

## 2.3. PLC

Los controladores lógicos programables o PLC (*programmable logic controller* en sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos muy usados en automatización industrial. Como su mismo nombre lo indica, se ha diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real. Por lo general, es posible encontrar este tipo de equipos en ambientes industriales.

Los PLC sirven para realizar automatismos; son dispositivos electrónicos que reproducen programas informáticos, que permiten controlar procesos. Estos equipos pueden contar tanto con salidas como entradas del tipo Analógico y/o Digital. Su costo tiende a ser moderado para sus grandes aplicaciones y reemplazan completamente a la lógica cableada. Dejando de esta manera solo elementos de potencia.

Dentro de las ventajas que estos equipos poseen se encuentra que, gracias a ellos, es posible ahorrar tiempo en la elaboración de proyectos, pudiendo realizar modificaciones sin costos adicionales. Por otra parte, son de tamaño reducido y mantenimiento de bajo costo, además permiten ahorrar dinero en mano de obra y la posibilidad de controlar más de una máquina con el mismo equipo. Sin embargo, y como sucede en todos los casos, los controladores lógicos programables, o PLC's, presentan ciertas desventajas como es la necesidad de contar con técnicos cualificados y adiestrados específicamente para ocuparse de su buen funcionamiento. Su historia se remonta a finales de la década de 1960, cuando la industria buscó en las nuevas tecnologías electrónicas una solución más eficiente para reemplazar los sistemas de

control basados en circuitos eléctricos con relés, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinacional.

Hoy en día, los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control. [11]

## **2.4. Neumática**

La neumática es la tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos. El aire es un material elástico y, por tanto, al aplicarle una fuerza se comprime, mantiene esta compresión y devuelve la energía acumulada cuando se le permite expandirse, según dicta la ley de los gases ideales.

La generación, almacenaje y utilización del aire comprimido resultan relativamente baratos y además ofrece un índice de peligrosidad bajo en relación a otras energías como la electricidad y los combustibles gaseosos o líquidos. Ofrece una alternativa altamente segura en lugares de riesgo de explosión por deflagración, donde otras energías suponen un riesgo importante por la producción de calor, chispas, etc. Por estas ventajas las instalaciones de aire comprimido son ampliamente usadas en todo tipo de industrias, incluso en todo tipo de transporte, aéreo, terrestre y marítimo.

Tanto la lógica neumática como la realización de acciones con neumática tienen ventajas y desventajas sobre otros métodos (hidráulica, eléctrica, electrónica). Algunos criterios a seguir para tomar una elección son:

- El medio ambiente. Si el medio es inflamable no se recomienda el empleo de equipos eléctricos y tanto la neumática como la hidráulica son una buena opción.
- La precisión requerida. La lógica neumática es de todo o nada, por lo que el control es limitado. Si la aplicación requiere gran precisión son mejores otras alternativas electrónicas.

Por otro lado, hay que considerar algunos aspectos particulares de la neumática:

- Requiere una fuente de aire comprimido, por lo que se ha de emplear un compresor.
- Es una aplicación que no contamina por sí misma al medio ambiente (caso hidráulica).

- Al ser un fluido compresible absorbe parte de la energía, mucha más que la hidráulica.
- La energía neumática se puede almacenar, pudiendo emplearse en caso de fallo eléctrico.

## **2.5. Vacío**

El vacío es la ausencia total de material en los elementos (materia) en un determinado espacio o lugar, o la falta de contenido en el interior de un recipiente. Por extensión, se denomina también vacío a la condición de una región donde la densidad de partículas es muy baja, como la de una cavidad cerrada donde la presión de aire u otros gases es menor que la atmosférica.

Puede existir naturalmente o ser provocado en forma artificial, ya sea para usos tecnológicos o científicos, o en la vida diaria. Se aprovecha en diversas industrias, como la alimentaria, la automovilística o la farmacéutica.

De acuerdo con la definición de la Sociedad Estadounidense del Vacío o AVS (1958), el término se refiere a cierto espacio lleno con gases a una presión total menor que la presión atmosférica, por lo que el grado de vacío se incrementa en relación directa con la disminución de presión del gas residual. Esto significa que cuanto más disminuyamos la presión, mayor vacío obtendremos, lo que nos permite clasificar el grado de vacío en correspondencia con intervalos de presiones cada vez menores.

## **2.6. Generador de vacío**

Los generadores de vacío de FESTO trabajan conforme al principio Venturi. El diagrama del generador se muestra en la Figura 2.4. El aire comprimido fluye desde la conexión de presión hacia el eyector. Mediante la reducción de la sección en la tobera Venturi aumenta la velocidad de circulación del aire hasta la velocidad del sonido. Tras la salida por la tobera Venturi, el aire se expande y fluye a través de la tobera receptora hacia la salida (silenciador). Ello produce un vacío en la cámara situada entre la tobera Venturi y la tobera receptora, lo que provoca que el aire sea aspirado desde la conexión de vacío. [5]

El aire aspirado y el aire de escape salen juntos a través de la salida (silenciador). Fáciles de instalar, operación económica, tamaño compacto, bajos consumos de aire.

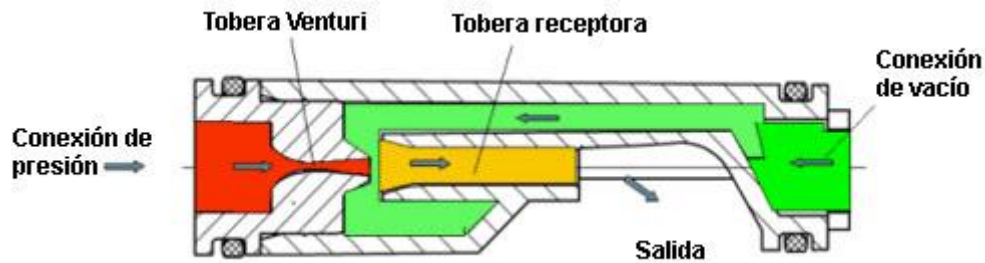


Figura 2.4. Diagrama Generador de Vacío. [5]

La velocidad del aire en un generador de vacío alcanza un valor superior a Mach 3.

Mach 1 = velocidad del sonido

Mach 2 = dos veces la velocidad del sonido

Mach 3 = tres veces la velocidad del sonido

Usos

Máquinas de envasado, transporte de objetos con copas de vacío, desgasificación, moldeado, prueba de instrumentos, atmósferas explosivas, etc.

## 2.7. Ventosas

Las ventosas son una pieza importante para la transportación de productos en la industria automatizada de cualquier ramo. Las ventosas tienen una serie de aplicaciones comerciales e industriales. Ventosas más grandes se utilizan para mantener temporalmente y mover grandes paños de vidrio. Las ventosas especializadas también han sido utilizadas por escaladores urbanos para escalar de edificios con superficies lisas exteriores.

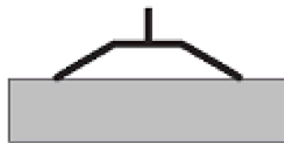
Una ventosa, es un objeto que utiliza la presión negativa del fluido del aire o agua para adherirse a las superficies no porosas. Existen ventosas creadas artificialmente, y también se encuentran como rasgos anatómicos de algunos animales como pulpos y calamares. (Ver Figura 2.5 y 2.6).



## Mecanismo

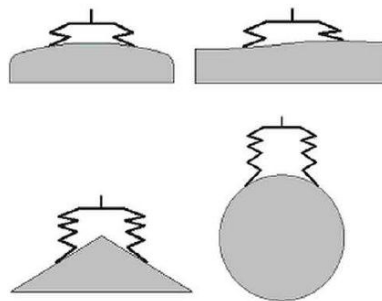
La cara abierta de la ventosa tiene una superficie curva. Cuando el centro de la ventosa se presiona contra una superficie plana y no porosa, el volumen del espacio entre la ventosa y la superficie plana se reduce, lo que causa que el líquido entre ésta y la superficie sea expulsado más allá del borde de la copa circular. Cuando el usuario deja de ejercer presión física en el centro de la parte exterior de la ventosa, la sustancia elástica de la cual está hecha la ventosa hace que la misma tienda a recuperar su forma original, curva. Debido a que toda la presión ya ha sido forzada a salir del interior de la ventosa, la cavidad que tiende a desarrollarse entre ésta y la superficie plana contiene poco o nada de fluido, y por lo tanto la presión que ejerce sobre la ventosa es despreciable. La diferencia de presión entre la atmósfera en el exterior de la ventosa, y la cavidad de baja presión en el interior de la estructura, es lo que mantiene la ventosa adherida a la superficie. La duración del efecto de succión depende principalmente de cuánto tiempo toma que el fluido se filtre de nuevo en la cavidad entre la ventosa y la superficie, igualando la presión con la atmósfera circundante. Esto depende de la porosidad, rugosidad de la superficie y del borde de la ventosa.

Existen distintos tipos de ventosas que proporciona el fabricante. Para superficies lisas, ligeramente onduladas y arqueadas.



**Figura 2.5. Ventosa estándar.** [5]

Para superficies inclinadas. Para superficies arqueadas o redondas, o para piezas grandes y flexibles, se encuentran las ventosas de fuelle, las cuales permiten adherirse a superficies irregulares. [5]



**Figura 2.6. Ventosa de fuelle.** [5]

## 2.8. Cinemática directa

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. Dado que un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia, de esta forma el problema cinemática directa se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación  $T$  que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Esta matriz  $T$  será en función de las coordenadas articulares.

En general, un robot de  $n$  grados de libertad está formado por  $n$  eslabones unidos por  $n$  articulaciones, de forma que para cada articulación eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia solidario a él y utilizando transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot. La forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg. Denavit y Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón  $i$  de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Según la representación de D.H. escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociadas a cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento  $i$  con el sistema del elemento  $i-1$ . Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

- 1.-Rotación alrededor del eje  $z_{i-1}$  un Angulo  $\theta$ .
- 2.-Traslación a lo largo de un  $z_{i-1}$  una distancia  $d_i$ , vector  $d_i$   $(0, 0, d_i)$ .
- 3.-Traslación a lo largo de  $x_i$  una distancia  $a_i$ , vector  $a_i$   $(0, 0, a_i)$ .
- 4.-Rotación alrededor del eje  $x_i$  un ángulo  $\alpha$ .

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. Se tiene como en la ecuación 1.

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \mathbf{T}(z, \theta_i) \mathbf{T}(0, 0, d_i) \mathbf{T}(a_i, 0, 0) \mathbf{T}(x, \alpha_i) \quad (1)$$

Realizando el producto entre matrices, se muestra en la ecuación 2.

Donde  $\theta_i$ ,  $a_i$ ,  $d_i$  y  $\alpha_i$  son los parámetros D-H del eslabón  $i$ . De este modo, basta con identificar los parámetros para obtener las matrices  $A$  y relacionar así todos y cada uno los eslabones del robot. [2]

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}\mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

### 2.8.1 Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemática directa.

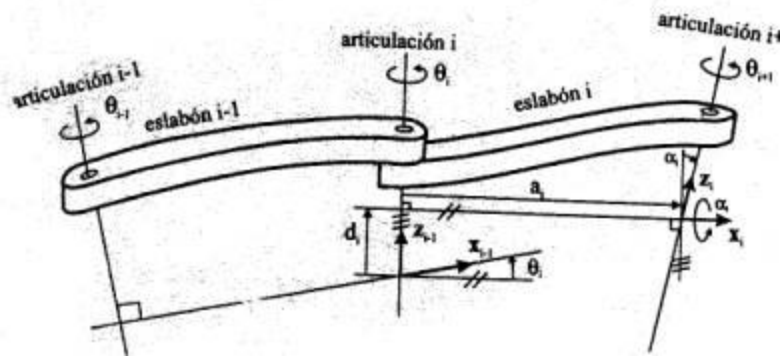


Figura 2.7. Ejemplo parámetros Denavit-Hartenberg. [6]

Los cuatro parámetros de DH ( $q_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$ ) dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y el siguiente. (Ver Figura 2.7 y Tabla 2.1). [2]

Tabla 2.1. Parámetros de Denavit – Hartenberg. [6]

Parámetros de Denavit – Hartenberg.	
Parámetro	Definición
$\theta_i$	Es el ángulo que forman los ejes $X_{i-1}$ y $X_i$ medido en un plano perpendicular al eje $Z_{i-1}$ , utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.
$d_i$	Es la distancia a lo largo del eje $Z_{i-1}$ desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje $Z_{i-1}$ con el eje $X_i$ . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
$a_i$	Es la distancia a lo largo del eje $X_i$ que va desde la intersección del eje $Z_{i-1}$ con el eje $X_i$ hasta el origen del sistema $i$ -ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes $Z_{i-1}$ y $Z_i$ .
$\alpha_i$	Es el ángulo de separación del eje $Z_{i-1}$ y el eje $Z_i$ , medido en un plano perpendicular al eje $X_i$ , utilizando la regla de la mano derecha.

Una vez obtenidos los parámetros DH, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot es inmediato, ya que vienen dadas por las matrices A, que se calcula según la expresión general. Las relaciones entre eslabones no consecutivos vienen dadas por las matrices T que se obtienen como producto de un conjunto de matrices A.

## **2.9. Métodos de calibración de cámaras.**

Dentro del área de visión por computadora un aspecto importante a considerar es la calibración de la cámara, dicho proceso consiste en determinar los parámetros intrínsecos (distancia focal, asimetría, factor de factor de distorsión y centro óptico del plano imagen) y los parámetros extrínsecos.

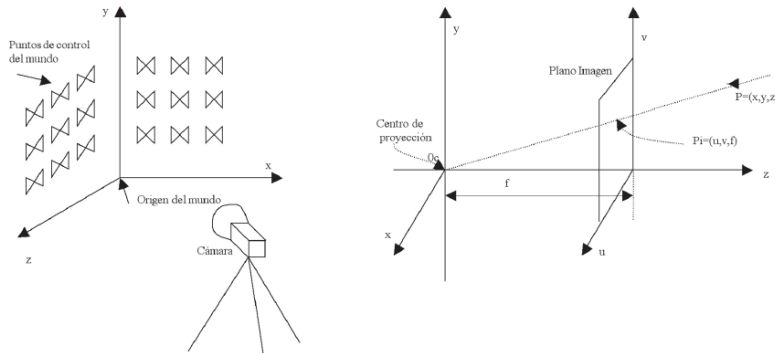
Existen diversos métodos que básicamente se diferencian en la forma de adquirir desde las imágenes los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara.

La necesidad de extraer información métrica a partir de imágenes 2D del mundo real, nos lleva a realizar el proceso de la calibración de la cámara. Aunque no es obligatoria la calibración de la cámara, ya que existen técnicas para inferir esta información desde imágenes captadas por cámaras no calibradas, a través de procesos iterativos de auto-calibración o el convencional proceso de calibración de los 3 puntos, el proceso de calibración de cámara abre la posibilidad de realizar aplicaciones efectivas en visión, tal como realidad aumentada, reconocimiento, seguimiento y reconstrucción 3D, los cuales se basan en el conocimiento de calibración y pose de la cámara (Trucco, 1998).

Por lo tanto, el objetivo principal de la calibración de cámara consiste en describir un modelo de proyección que relacione los sistemas de coordenadas (plano imagen – mundo real) que permiten obtener los parámetros de la cámara. Es decir, determinar la geometría y características internas de la cámara (parámetros intrínsecos) y la pose (parámetros extrínsecos) de la cámara relativa a una imagen en un sistema de coordenadas. Estos parámetros normalmente son calculados desde un patrón de calibración que contiene rasgos fácilmente detectables de manera precisa en la imagen capturada (Tuceryan, 1995).

Para localizar un objeto en el mundo real, se establece un marco de referencia (llamado marco de referencia del mundo real). Mientras que un objeto en una imagen es localizado en términos de coordenadas de píxeles, los cuales están en el marco de referencia de la imagen. Para obtener una relación entre ambos marcos de referencia, es necesario establecer ecuaciones que unan el marco de referencia del mundo con el marco de referencia de la imagen, con el fin de establecer la relación entre los puntos en coordenadas en el espacio 3D y los puntos en coordenadas de imagen 2D. Para lograr esta relación se establece un marco de referencia intermedio, llamado marco de

referencia de la cámara. Por lo tanto, se deben encontrar las ecuaciones que unan el marco de referencia de la cámara con el marco de referencia de la imagen, y las ecuaciones que unan el marco de referencia del mundo real con el marco de referencia de la cámara. (Ver Figura 2.8). Al resolver el sistema generado se obtiene la relación buscada, lo cual es equivalente a encontrar las características de la cámara.



**Figura 2.8. Grilla padrón de Calibración y sistema de referencia. [7]**

La calibración de cámara se puede clasificar en dos categorías: Calibración fotogramétrica y auto-calibración (Zhang, 1999):

- Calibración fotogramétrica. Consiste en el cálculo de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara a partir de un conjunto de puntos de control, conocidas las coordenadas 3D de esos puntos y midiendo las correspondientes coordenadas 2D en una imagen obtenida con dicha cámara. Esta calibración utiliza un objeto 3D (o patrones) de referencia cuya geometría es conocida a su perfección. Los patrones de calibración normalmente están posicionados en dos o tres planos ortogonales entre ellos. En algunos casos, basta con un único plano, cuya traslación es perfectamente conocida (Zhang, 1999).
- Auto-calibración. Este método requiere de varias imágenes de una misma escena, por lo tanto se propone el movimiento de la cámara observando una escena estática y mediante la correspondencia entre puntos de diferentes imágenes se pueden encontrar los parámetros de un modelo que determine dicha correspondencia. La rigidez de la escena impone en general restricciones sobre los parámetros de cámara. Tres imágenes tomadas por una misma cámara con parámetros intrínsecos fijos son suficientes para obtener tanto los parámetros extrínsecos como intrínsecos.

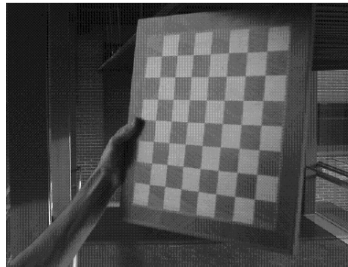
Dos métodos comunes de calibración, en la categoría de calibración fotogramétrica, son “Calibración directa de parámetros” y “Recuperación desde la homografía o matriz de proyección”. A través de la “Calibración directa de parámetros” se obtienen los parámetros extrínsecos e intrínsecos directamente, es decir, requieren de patrones de calibración consistentes, en al menos dos planos ortogonales, y a través de la “Recuperación desde la matriz de proyección” se obtienen los parámetros a partir de los valores de la homografía o matriz de proyección, una variante recientemente propuesta, consiste en utilizar patrones que descansan en un único plano. Tommaselli y Tozzi (Tommaselli y Tozzi, 1999), abordaron el problema de calibración dinámica de una cámara considerando un objeto en movimiento constante sobre líneas rectas como referencias con la cámara fija. El modelo se basa en la equivalencia del vector normal al plano de interpretación en el marco de la imagen y el vector normal al plano de interpretación rotado en el marco del objeto. Para resolver la calibración dinámica de una cámara se aplica un proceso iterativo basado en el filtro de Kalman usando los parámetros de orientación de la cámara secuencialmente estimados para retroalimentar el proceso de extracción de características de la imagen. La solución propuesta se implementó usando datos reales de un cubo moviéndose. Las restricciones que deben resaltarse son que únicamente se considera movimiento lineal constante y sobre una superficie plana. Dentro de las pruebas, los parámetros de traslación no son muy confiables y los parámetros intrínsecos deben considerarse más precisos y con cámaras de mejor resolución. De igual forma no se aplicaron técnicas de procesamiento de imagen muy efectivas para poder alcanzar resultados más deseables.

Peter Eisert (Eisert, 2002) propone una nueva técnica para la determinación de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara basada en un modelo que consiste en absorber información característica de una imagen que vinculamos con uno o varios objetos de prueba. Después obtiene su representación 3D, a la vez que compara en todo momento posible proyecciones en imagen de los puntos del modelo con las imágenes originales capturados por la cámara. El modelo prevé un proceso iterativo para disminuir el error entre imágenes originales y de proyección del modelo. Se plantean dos posibles estrategias, la primera hace sólo la estimación de los parámetros extrínsecos y la segunda de los dos tipos de parámetros. Así, el patrón de calibración utilizado no se restringe a mostrar simples características discretas detectables fácilmente. [7]

El Método de Faugeras (Faugeras, 1992), es un proceso de calibración que consiste en estimar la matriz de proyección  $P$ , y posteriormente se estiman los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara a partir de la matriz de proyección obtenida anteriormente. La calibración se logra descomponiendo en valores singulares la matriz que forma el sistema de ecuaciones que proyecta un punto del espacio en el plano

imagen de la cámara. Obteniéndose una matriz de proyección a partir de la cual se extraen todos los parámetros, tanto los extrínsecos (traslación y rotación del patrón respecto a la cámara) como los intrínsecos (centro del eje óptico y factores de escalado). Dicho método, no toma en cuenta la distorsión introducida por las lentes. Para realizar el método de Faugeras únicamente es necesaria una imagen.

(Zhang, 1999) propone una técnica de calibración utilizando una plantilla plana (con forma de tablero de ajedrez) como la de la Figura 2.9 colocada en diferentes poses.



**Figura 2.9. Plantilla plana de calibración.** [7]

Es una técnica flexible ya que no requiere una preparación exhaustiva de la escena. Teniendo como ventaja sobre los demás métodos de calibración la fácil obtención de los parámetros de la cámara a partir de una plantilla plana sin necesidad de conocer la posición de algún punto de la escena. Esto se debe a la selección de las coordenadas del mundo de tal forma que dos de sus ejes coinciden con los lados de la plantilla, y el tercero (Z) es perpendicular a esta. Dicho método requiere de al menos tres imágenes con la plantilla tomada en distintas orientaciones. Este número de imágenes puede ser inferior si se fijan los valores de algunos parámetros intrínsecos. Por ejemplo, si no se calcula la ortogonalidad del plano imagen, sólo son necesarias dos imágenes.

El método de Heikkila (Heikkila y Silven, 1997) no necesita conocer la posición absoluta de los puntos en referencia para realizar el proceso de calibración. De igual manera que los métodos de calibración explicados anteriormente, obtiene los parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo, pero toma en cuenta las distorsiones radial y tangencial de la óptica, convirtiéndose en un método no lineal. Por tal motivo, primero realiza una aproximación inicial de la matriz de transformación basándose en las características de la óptica proporcionadas por el fabricante.

En cambio (Tuceryan, 1995) y (Trucco, 1998) se basan en un modelo conocido 3D y su correspondencia en el plano imagen 2D, diferenciándose en la consideración de los parámetros intrínsecos que deben ser determinados o de influencia en la matriz de cámara final. [7]



### 2.9.1. Modelo matemático de una cámara (Pinhole)

Se describe el modelo matemático que definen la transformación que aplica la óptica de un sistema de visión a la luz que recibe: modelo del agujero o modelo pinhole. Además, se describe cómo distorsionan las ópticas los rayos de luz provenientes de la escena.

Coordenadas homogéneas

Las coordenadas homogéneas de un punto tridimensional con coordenadas cartesianas  $(X, Y, Z)$  se definen como el punto tetra-dimensional  $(kX, kY, kZ, k)T$ , donde  $k$  es una constante que define el escalado (habitualmente se suele utilizar  $k=1$ ). Por tanto, un punto  $P$  del espacio, representado mediante coordenadas homogéneas, se expresa en forma vectorial como en la ecuación 3.

$$P = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Traslación

La traslación de un punto  $P = [X \ Y \ Z] T$  expresada mediante coordenadas homogéneas se puede observar en la ecuación 4, donde  $[X_0 \ Y_0 \ Z_0] T$  es el vector de traslación.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Escalado

El escalado de un punto del espacio  $P = [X \ Y \ Z] T$  con los factores  $S_X$ ,  $S_Y$  y  $S_Z$  en los ejes cartesianos  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , respectivamente, expresado en coordenadas homogéneas se puede observar en la ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

## Rotación

La rotación de un punto del espacio  $P = [X \ Y \ Z]^T$  respecto a cada uno de los ejes cartesianos, de forma que  $\alpha$  es el ángulo de rotación en el eje X,  $\beta$  el ángulo de rotación alrededor del eje Y y el ángulo  $\gamma$  en el eje Z, expresada en coordenadas homogéneas viene dada por las matrices  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$  y  $R_\gamma$  para los ejes X, Y y Z, respectivamente, véase la ecuación 6.

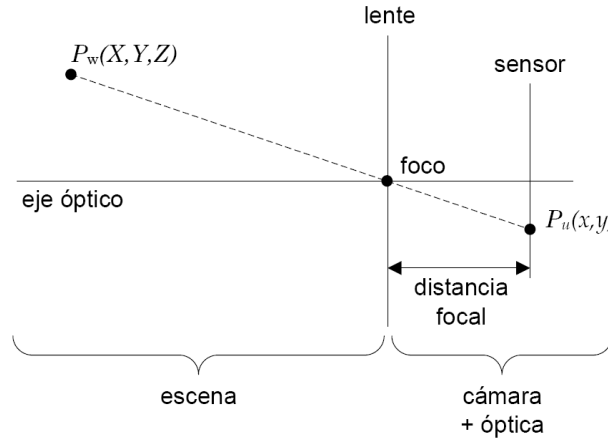
$$\begin{aligned} R_\alpha &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_\beta &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_\gamma &= \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

El modelo pinhole es el modelo de transformación utilizado en visión por computadora para eliminar las deformaciones en imágenes causadas por distorsiones no lineales de la óptica. En este modelo se considera la óptica del sistema formada por una única lente representada por un punto infinitesimal, denominado foco, a través del cual pasan los rayos de luz procedentes de la escena hacia el sensor de la cámara. La Figura 2.10 muestra una representación del modelo pinhole.

Dado que el foco en este modelo representa un agujero de diámetro infinitesimal, sólo uno de los rayos de luz de todos los que proceden del mismo punto de la escena llega al sensor de la cámara, es decir, sobre cada elemento del sensor sólo incide un único rayo de luz. Por tanto, todos los puntos de la escena estarán perfectamente enfocados en la imagen. Este modelo matemático equivale a una transformación perspectiva y el único parámetro del modelo es la distancia focal de la cámara.

La proyección de la luz reflejada por los objetos de la escena en el plano de la imagen se considera realizada, independientemente de la óptica utilizada en el sistema de visión, mediante una transformación de perspectiva.

Esta transformación define, geoméricamente, la formación de la imagen a partir de la proyección de un espacio tridimensional a otro bidimensional.



**Figura 2.10. Modelo Pinhole.** [7]

El modelo de cámara pinhole describe las relaciones entre un punto 3D, coordenadas globales  $P_w = [X, Y, Z, 1]^T$ , y su proyección en el plano imagen  $P_u = [u, v, 1]^T$  como en la ecuación 7.

$$sP_u = A[RT]P_w$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A[RT] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde  $s$  es un factor de escala,  $R$  es la rotación existente entre los marcos de referencia,  $T$  es el vector de traslación,  $A$  es la matriz de los parámetros intrínsecos de la cámara, la cual está en función de las coordenadas del centro de la imagen ( $u_0, v_0$ ),  $\alpha$  y  $\beta$  los cuales se derivan del largo focal y tamaño del píxel y la asimetría. Así la matriz de cámara se muestra en la ecuación 8. [7]

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 2.9.2. Toolbox de Matlab para la calibración de las cámaras (Zhang)

Una de las partes que conforman un sistema de visión por computadora, es una cámara digital o analógica. En donde para aplicaciones con visión por computadora se debe considerar el proceso denominado calibración de cámara, el cual consiste en determinar los parámetros internos y extrínsecos de la cámara. Uno de los métodos de calibración más común, y que viene implementado como un Toolbox del software de Matlab, es el algoritmo de Zhang (Camera Calibration Toolbox for Matlab, 2010).

Por lo tanto, la calibración es el proceso de estimar los parámetros extrínsecos e intrínsecos de las cámaras. Para utilizar la herramienta del Toolbox es necesario utilizar un patrón de calibración para obtener imágenes del patrón desde las diferentes posiciones. El patrón está formado por cuadrados negros y blancos con un tamaño conocido. El objetivo de los cuadros (blancos y negros) es detectar las esquinas fácilmente y obtener un conjunto de puntos tridimensionales conocidos y su proyección en las diferentes posiciones. La herramienta detecta las proyecciones de los puntos 3D en la imagen 2D y resuelve el sistema de ecuaciones correspondiente para hallar los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Es necesario indicar el tamaño del cuadrado, y el origen de coordenadas del mundo fijado en una esquina del patrón y los límites del patrón siempre en el mismo orden para todas las posiciones del patrón. Esto es así, para fijar un mismo sistema de coordenadas del mundo para todas las posiciones del patrón. El algoritmo establece que son necesarias un mínimo de 3 posiciones distintas del plano de calibración para la calibración, como se muestra en la Figura 2.11.

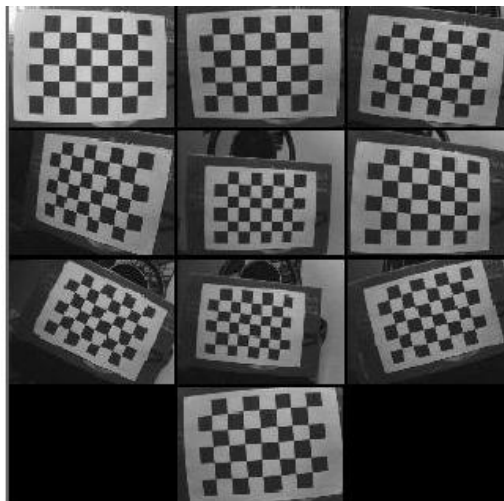
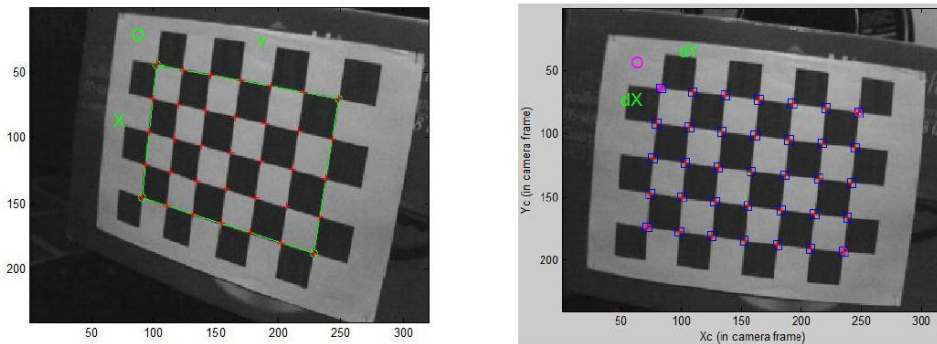


Figura 2.11. Patrón de calibración en 10 poses diferentes. [7]

La calibración se realiza sobre un plano de puntos (patrón de calibración), y no es necesario conocer el desplazamiento que se realiza entre las diferentes tomas de imágenes.

Para el proceso de calibración se utiliza una técnica basada en homografías que hace uso de un patrón de calibración, en este caso un tablero de ajedrez, del cual se conoce sus dimensiones. Con el objetivo de hallar las esquinas de cada uno de los patrones se procede utilizar el algoritmo de Harris que básicamente es un detector de esquinas, posteriormente se realiza una localización a nivel sub-píxel de los puntos encontrados por Harris, la Figura 2.12 muestra la detección de esquinas y puntos en un patrón.



**Figura 2.12. Detección del patrón. a) Detección de las esquinas del patrón, b) Detección de los puntos internos del patrón. [7]**

Después del proceso de obtención de las esquinas y puntos de cada uno de los patrones se procede a realizar la calibración con cada uno de los puntos obtenidos iterándolos en cada patrón subsecuente.

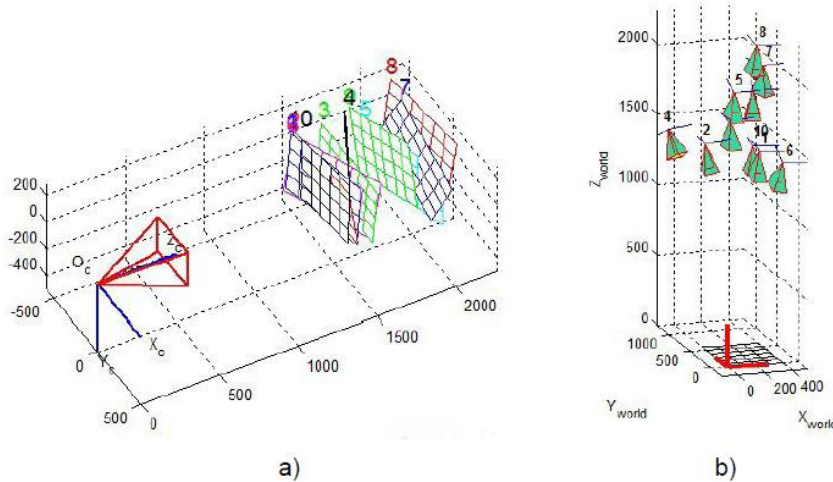
El resultado que entrega el Toolbox son los parámetros la cámara. Los parámetros intrínsecos son:

- Centro del eje óptico ( $cc = [u0, v0]$ ): también llamado punto principal. Define el punto donde el eje óptico ( $zc$ ) atraviesa el plano imagen. Las coordenadas de este punto vienen dadas en píxeles. Se almacena en un vector 2x1 llamado “ $cc$ ”.
- Distancia focal ( $f$ ): distancia entre el centro óptico y el centro del plano imagen, viene dada en píxeles. Se almacena en un vector llamado “ $fc$ ”.
- Coeficiente de asimetría: es el ángulo definido por los ejes X y Y del píxel, actualmente las cámaras tienen píxeles cuadrados, dando como valor igual a  $90^\circ$ . Se almacena en una variable escalar llamada “ $alpha_c$ ”.
- Coeficientes de distorsión: aquí vienen incluidos los coeficientes de distorsión radial y tangencial. Se almacena en un vector 5x1 llamado “ $kc$ ”.

Mientras que los parámetros extrínsecos están dados por:

- Un vector de rotación de dimensiones 3x1, que mediante el “*algoritmo de rodrigues*” (Taubin y Savarese, 2001), se convierte a una matriz de rotación de 3x3.
- Un vector de traslación (3x1) de que va del marco de referencia del origen del patrón de calibración a la cámara.

En la Figura 2.13 se puede apreciar la relación de los parámetros extrínsecos de la cámara, para cada patrón presentado se conoce su posición y orientación al eje principal, esto nos sirve para lograr una relación entre todos los puntos de los tableros y obtener un modelo de corrección para cualquier punto presentado a futuro.



**Figura 2.13. Vista del patrón. a) Vista de las posiciones de los patrones de calibración, b) Vista del patrón de calibración en referencia a la cámara.**

## Capítulo III. Diagnóstico del robot

En este capítulo se presenta cada una de las partes que conforman al robot hexápodo, como la tarjeta controladora, rediseño de extremidades y el sistema de succión. La descripción del fundamento teórico de cada una de las partes se encuentra en el capítulo II y la información técnica en los anexos correspondientes.

### 3.1 King Spider

El robot hexápodo partió de un diseño comercial de la compañía BIOLOID, (Figura 3.1.) las piezas de este modelo permiten que el robot pueda tener diferentes configuraciones, dentro de ellas una configuración de araña, la cual cuenta con 6 extremidades idénticas y cada una de ellas compuesta por un sistema mecánico, la distribución de las extremidades del robot es de forma radial, cada extremidad cuenta con 3 servomotores y esto nos da un total de 18 servomotores.



Figura 3.1. BIOLOID Kit King Spider. [3]

Este kit cuenta con una tarjeta controladora CM-510. Unidad de control principal, como se muestra en la Figura 3.2, los datos técnicos se mencionan en la tabla anexo A.



Figura 3.2. Control CM-510. [3]

El controlador CM-510 se conecta a la computadora con una comunicación serial-USB, usando una interfaz USB2Dynamixel. (Ver Figura 3.3.)



Figura 3.3. Conexión CM-510. [3]

### 3.1.1. USBDynamixel

USB2Dynamixel (Ver Figura 3.4.) es un dispositivo para operar los servomotores Dynamixel directamente desde la computadora, por medio del puerto USB, además, USB2Dynamixel puede ser usado para cambiar del puerto USB a Serial en la PC.



Figura 3.4. USBDynamixel. [3]

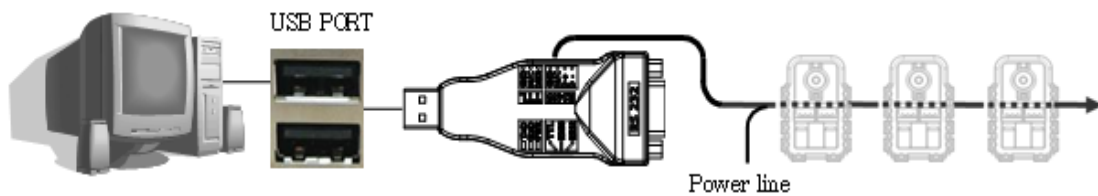
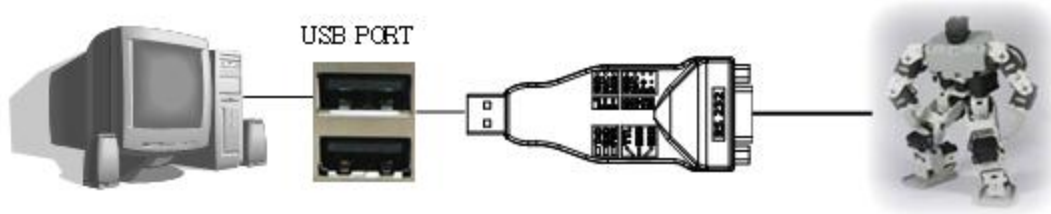


Figura 3.5. Control de servos Dynamixel usando PC. [3]





**Figura 3.6. Control del robot con puerto serial. [3]**

USBDynamixel cuenta con tres tipos de comunicación, los cuales son:

- Comunicación USB (Figura 3.5.)
- Comunicación RS-485 y RS-232 (Figura 3.6.)

### **3.1.2 Servomotores AX-12**

El robot hexápodo cuenta con 18 servomotores de la compañía BIOLOID, modelo AX-12+ como se muestra en la Figura 3.7, los datos técnicos se muestran en el anexo B.



**Figura 3.7. Servomotor AX-12. [3]**

### 3.1.3. Software de programación del Robot.

El software predeterminado del kit es RoboPlus, el cual se encarga de controlar los servomotores al igual que los sensores, este software se divide en tres programas, los cuales son RoboPlus Motion, RoboPlus Task y RoboPlus Manager, cada uno de estos poseen diferentes características para controlar el robot.

#### RoboPlus Motion

Se encarga de poder realizar los movimientos de cada motor y generar secuencias de movimiento para todos los servomotores, cuenta con una interfaz gráfica, la cual permite ver la simulación del movimiento del robot, también se puede controlar la velocidad y las repeticiones de los pasos. (Ver Figura 3.8).

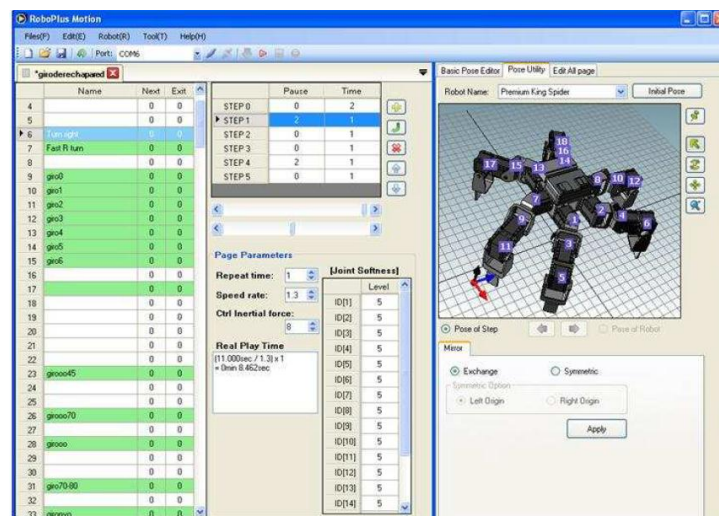


Figura 3.8. RoboPlus Motion. [3]

## RoboPlus Task

Se encarga del control del robot, es un programa que utiliza lenguaje tipo C, se pueden hacer lecturas de los 6 puertos analógicos, y ordenar las secuencias de los movimientos. (Ver Figura 3.9).

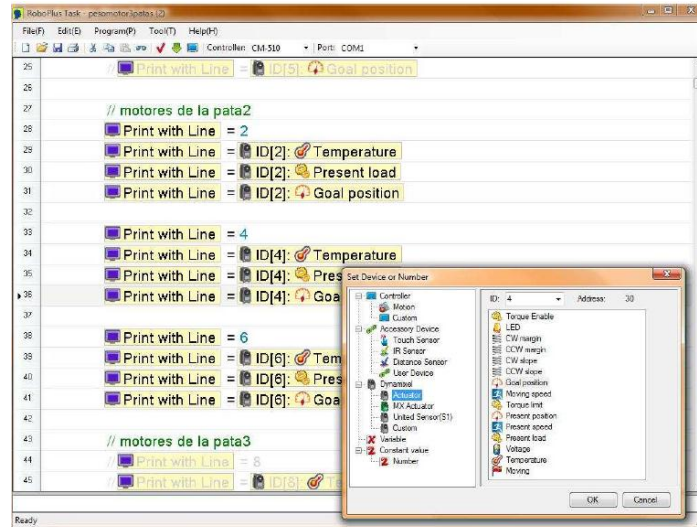


Figura 3.9. RoboPlus Task. [3]

## RoboPlus Manager

Es un software exclusivo para los servomotores Dynamixel, permite leer la información de cada motor, también es posible hacer cambios en el firmware de cada uno de ellos. (Ver Figura 3.10).

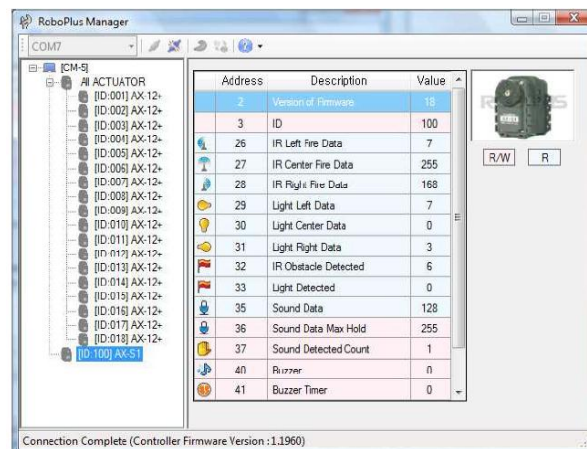


Figura 3.10. RoboPlus Manager. [3]

### 3.2. Sistema de succión

Las extremidades del robot tuvieron un rediseño (Ver figura 3.11) en el cual se le implementaron perfiles para unir el sistema de succión y así poder adherirse a las superficies verticales. A continuación se explica cada una de las partes de este sistema.



Figura 3.11. Rediseño final.

En la Figura 3.12 se muestra las cuatro partes necesarias para permitir la succión de una extremidad. A continuación se mencionan algunas de las partes que conforman el sistema.



Figura 3.12. Sistema de succión para una extremidad.

### 3.2.1. Generador de vacío

El proyecto cuenta con 6 generadores de vacío, de la compañía FESTO modelo VN-05-N-13-PQ2-VQ2, ver Figura 3.13, en la Tabla D.1 se muestran las características.

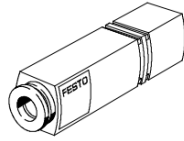


Figura 3.13. Generador de vacío. [5]

Las extremidades del robot cuentan con ventosas de fuelle, de la compañía FESTO modelo VASB-55-1/4-SI (Ver Figura 3.14), estas son necesarias para adaptarse a las superficies irregulares, arqueadas e inclinadas, son de material Silicona y cuenta con una resistencia térmica. Los datos técnicos se muestran en la Tabla E.1.



Figura 3.14. Ventosa VASB-55-1/4-SI. [5]

### 3.3. Sistema neumático

De forma general el sistema neumático consta de distintas partes, como el PLC, sensores, suministro de aire, electroválvulas, filtro de aire, generadores de vacío y ventosas. El sistema se encuentra estructurado en la Figura 3.15.

El PLC que se utiliza en el proyecto pertenece a la compañía FESTO, modelo CPX-CEC-C1, el cual cuenta con un módulo de 4 entradas digitales, 4 salidas digitales y un módulo de neumática que consta de 6 electroválvulas. Las especificaciones y diagrama del modelo se muestran en el Anexo C.

Cada extremidad cuenta con dos sensores de carrera que retroalimentan el sistema neumático, el suministro de aire es proporcionada por las instalaciones de CICATA.

El proceso empieza con un suministro de aire, el cual pasa por el filtro de aire de la compañía FESTO, este se utiliza para eliminar cualquier partícula que pudiera contener el aire, el PLC es el encargado de activar las electroválvulas por medio de sensores de carrera que cuenta cada extremidad, al momento de hacer contacto con la superficie los sensores se activan y el programa del PLC deja pasar el aire por medio de las ventosa de la extremidad correspondiente, el aire llega al generador de vacío, al producirse el vacío este se conduce hacia las ventosas y así obtenemos adherirnos a la superficie.

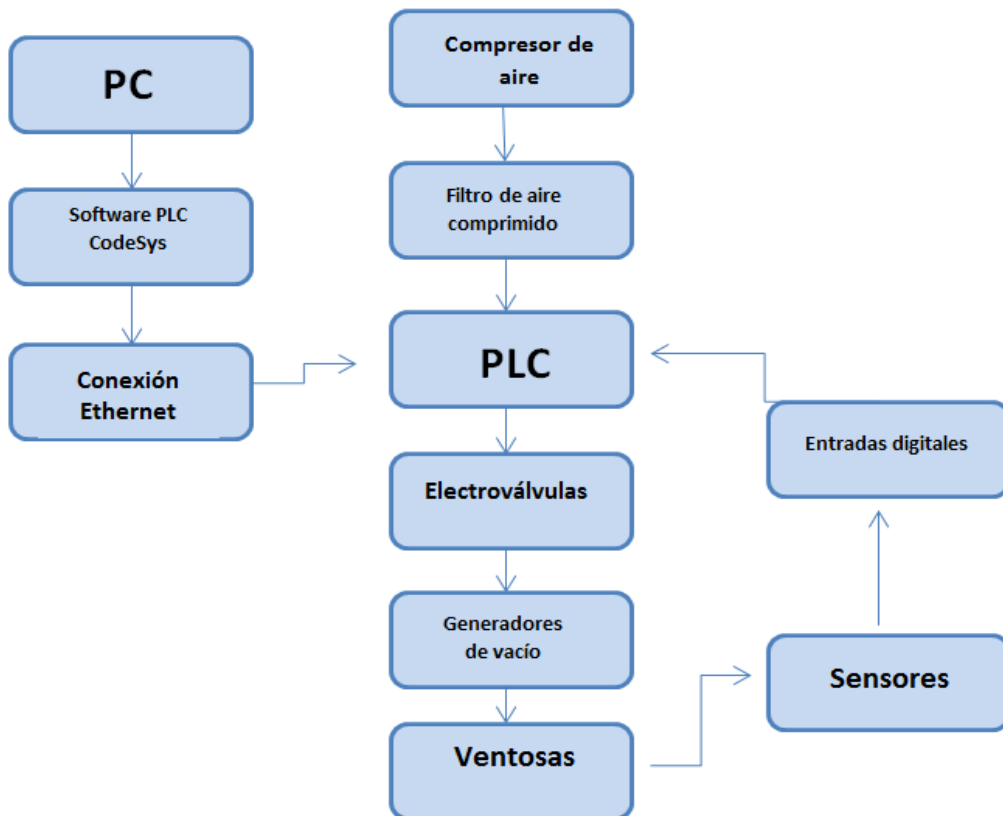


Figura 3.15. Diagrama sistema neumático.

## Capítulo IV. Desarrollo de la investigación

En este capítulo se describen las actividades que se realizaron para la obtención de los resultados esperados, como el desarrollo de la locomoción, la instrumentación del robot y la descripción de la metodología para el método de calibración de cámara.

### 4.1. Pruebas físicas con el sensor inclinómetro.

Se realizaron pruebas físicas con el sensor inclinómetro de la compañía SHARP modelo GP1S036, el funcionamiento del sensor inclinómetro y los datos técnicos del mismo se encuentran en el anexo G. Este sensor se pretende utilizar para fines de estabilidad del robot, ya que este se ubicaría en el torso, el sensor puede indicar las cuatro posiciones posibles del tórax y tener una retroalimentación para la locomoción del robot hexápodo.

La salida que se obtiene del sensor es tipo digital con dos bits de salida, se encuentra una variación de voltaje desde 2.2 hasta 4.98 volts, (Ver Figura 4.3.) a partir de estas mediciones se acopló el sensor con la tarjeta controladora CM-510. En la Figura 4.1. se muestran las conexiones eléctricas de los pines.

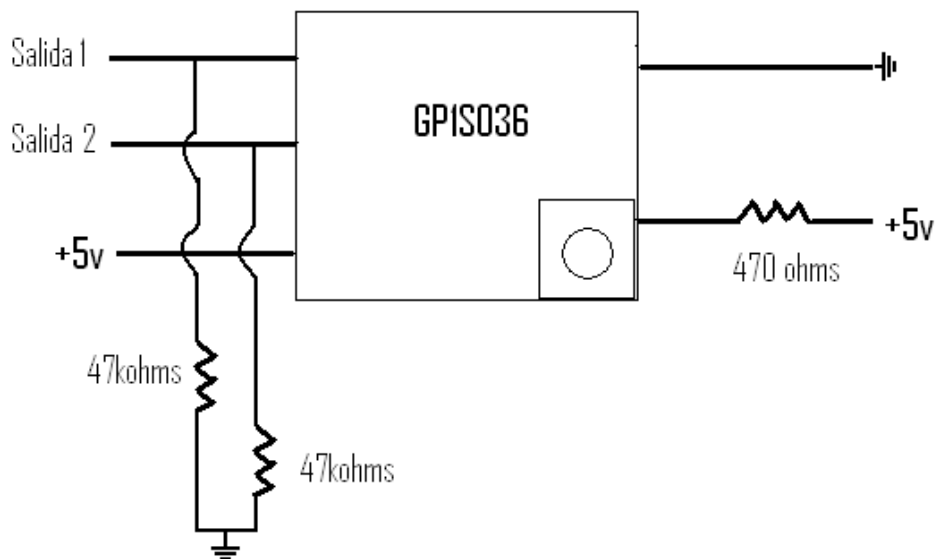


Figura 4.1. Sensor inclinómetro. [8]

Acoplamiento del inclinómetro con la tarjeta controladora

Información CM-510 puerto externo (Ver Figura 4.2):

#### PINES

- 1.- Salida: 5v
- 2.- Vcc (5v).
- 3.- ADC: lee señales analógicas.
- 4.- GND
- 5.- No se utiliza.



Figura 4.2. Conexiones eléctricas CM-510. [3]

A partir de las especificaciones técnicas, se acoplo el sensor inclinómetro con la tarjeta controladora, mediante cualquiera de los 6 puertos analógicos. La lectura del sensor es de valores de 0 y 1023 exclusivamente.

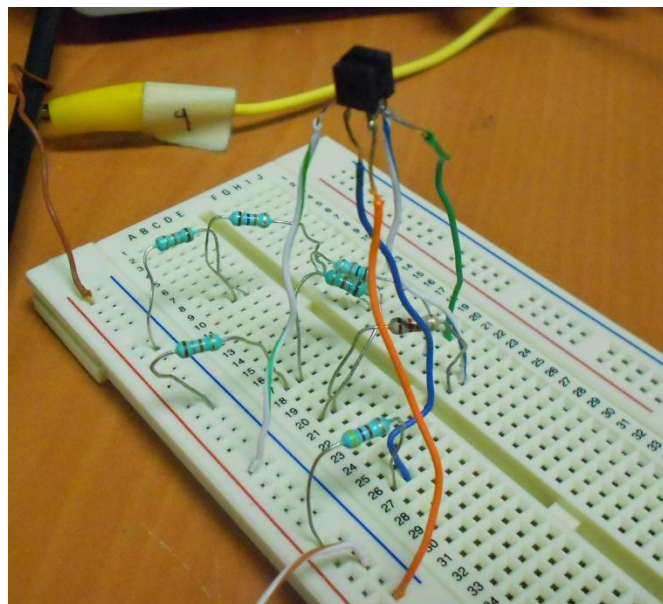


Figura 4.3. Prueba del inclinómetro.



Para la implementación del inclinómetro, se adaptó al robot hexápodo de una manera compacta, con la finalidad de no agregar más peso al robot, ya que es demasiado el peso de las mangueras de neumática, cables de alimentación, de comunicación y el de la cámara, por todo esto se ideó hacer un encapsulado del sensor, esto se hizo en una caja negra de 1.5 x 1 cm, teniendo todo el ajuste de resistencias dentro de esta. Para aislar el circuito por dentro y evitar problemas de cortocircuito, se añadió silicón dentro de la caja, dejando solamente los cables de alimentación y de los dos canales, como se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4. Encapsulado del inclinómetro.**

Se realizaron pruebas directas de la tarjeta controladora (CM-510) adaptando el inclinómetro, corroborando con un pequeño programa en la tarjeta para visualizar los valores del sensor, los datos arrojados por el sensor fueron de valores de 110 y 1000 (0.3v y 4.8v) teniendo valores lógicos (0, 1). El control de la tarjeta está muy limitada ya que solo acepta señales analógicas, por esto no se puede implementar mejores sensores ya que requieren de una comunicación serial o I2C y ni físicamente ni por software se puede implementar este tipo de comunicación, además se realizó una búsqueda exhaustiva en las tiendas electrónicas para encontrar un sensor analógico mejor que el que ya se tiene, en este caso acelerómetros de 3 ejes, giroscopios de 3 ejes o inclinómetros, desafortunadamente no se encontraron sensores con estas especificaciones solo los que ya se tienen, en este caso el giroscopio con el que se cuenta es de 2 ejes (X y Y) y un giroscopio de 3 ejes resultaría mucho mejor para saber la orientación precisa del tórax del robot, se concluye que este sensor es óptimo de acuerdo a las limitaciones que se tiene con la tarjeta controladora.

## 4.2. Cámara 3D

El Centro de Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) cuenta con una cámara estereoscópica modelo webcam 3D, de 8 Megapíxeles con interfaz USB (Ver Figura 4.5), el funcionamiento de la cámara se encuentra en el anexo H.



Figura 4.5. Cámara 3D. [9]

Esta se colocó en el tórax del robot, con la finalidad de poder visualizar en tiempo real el camino a recorrer del robot. Las ventajas de este tipo de cámara enfocándonos en el funcionamiento del robot será cuando la persona encargada de monitorear al robot pueda observar la trayectoria del mismo y así visualizar la profundidad del camino.

El montaje de la cámara fue con una placa de 6 x 5 cm de material policarbonato, como se muestra en la Figura 4.6.

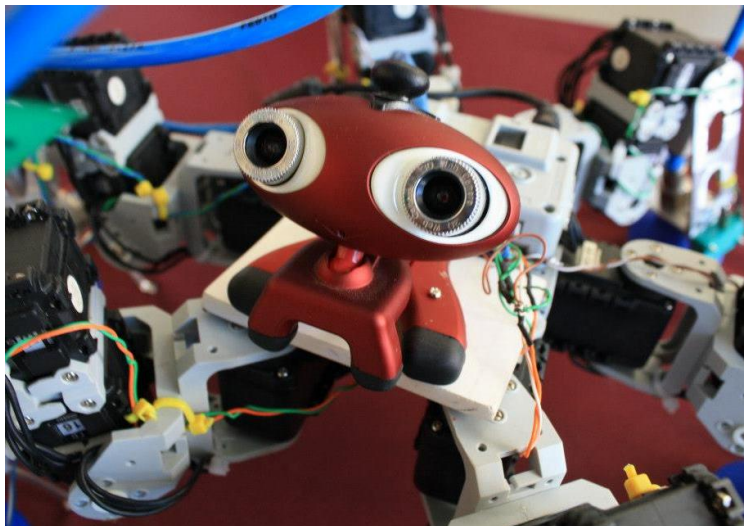


Figura 4.6. Montaje final de la cámara 3D.

### 4.3. Pruebas físicas con sensores de distancia.

Se realizaron pruebas físicas con dos diferentes sensores de distancia para después seleccionar con cual se tendría mejor desempeño, para utilizarlo en la instrumentación del robot, estos dos sensores arrojan salidas analógicas. Los datos técnicos de cada sensor se encuentran en el Anexo A.

#### Sensor DMS

Se realizaron 6 pruebas con este sensor DMS, para verificar su eficacia, en conclusión el sensor es exacto en cuanto a los resultados obtenidos y haciendo una comparación con los datos de la gráfica de respuesta (Figura e información técnica en el Anexo F), los resultados se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Lecturas del sensor de distancia (DMS).**

<b>Lectura Sensor de Distancia (DMS)</b>	
<b>Distancia (cm)</b>	<b>Lectura (0-1023)</b>
<b>9</b>	<b>628</b>
	<b>593</b>
	<b>598</b>
	<b>615</b>
<b>15</b>	<b>375</b>
	<b>363</b>
	<b>351</b>
	<b>340</b>
<b>20</b>	<b>262</b>
	<b>262</b>
	<b>271</b>
	<b>251</b>
<b>35</b>	<b>88</b>
	<b>79</b>
	<b>100</b>
	<b>93</b>
<b>80</b>	<b>56</b>
	<b>59</b>
	<b>59</b>
	<b>63</b>

## Sensor infrarrojo

Se realizaron pruebas para evaluar la eficiencia en la medición de la distancia (cm), el alcance de medición de este sensor es de 15 cm. Los resultados son exactos pero se tiene un rango limitado, los valores se muestran en la Tabla 4.2. Los datos técnicos se muestran en el Anexo F.

**Tabla 4.2. Lecturas del sensor infrarrojo.**

<b>Lectura Sensor infrarrojo</b>	
<b>Distancia (cm)</b>	<b>Lectura (0-1023)</b>
<b>0</b>	18
	18
	18
	18
<b>2</b>	359
	362
	356
	370
<b>3</b>	330
	344
	337
	322
<b>5</b>	147
	150
	154
	148
<b>10</b>	26
	25
	24
	27
<b>15</b>	7
	7
	7
	7

#### 4.4. Implementación de sensores de distancia

Originalmente el robot contaba con sensores de carrera (Ver Figura 4.7), el problema fue que los sensores perturbaban la locomoción del robot, ya que al dar los pasos estos interruptores llegan a atorarse entre ellos. Por lo tanto se hizo la implementación de sensores de distancia, los que se mencionan anteriormente, estos dan la ventaja de tener una mejor precisión al momento de activar las electroválvulas.

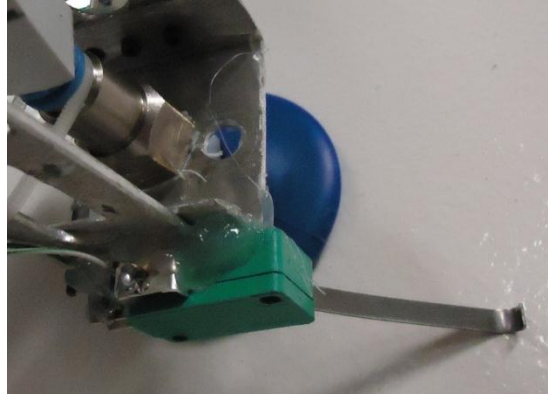


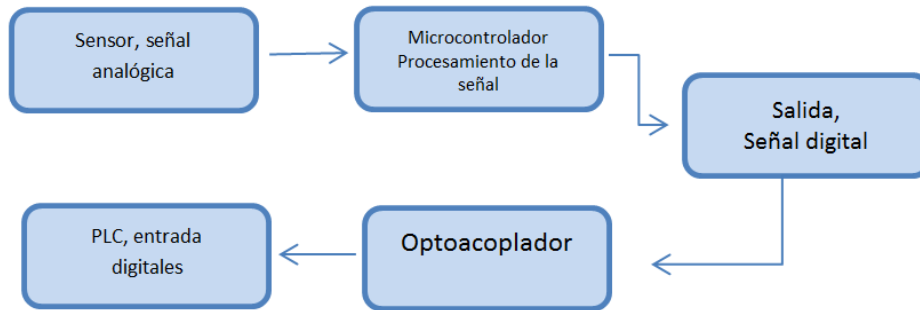
Figura 4.7. Sensor de fin de carrera.

Después de realizar las pruebas con dos diferentes sensores de distancia, se llegó a la conclusión que los sensores DMS darían mejores resultados al anexarlos al proyecto. Estos sensores DMS se alimentan de 5 volts y entregan un valor analógico, el PLC cuenta con entradas y salidas digitales, por esto se tuvo que implementar una tarjeta controladora para poder utilizar los sensores a fin de determinar la medida exacta del efector final cuando se encuentra con la superficie vertical.

El control de estos sensores se hizo con el microcontrolador PIC16f873A, el cual cuenta con un puerto A, este tiene entradas analógicas, las cuales leen los sensores y el microcontrolador procesa la señal analógica y activa las salidas del puerto B, en cada salida del dicho puerto se encuentra un optoacoplador que se encarga de mandar un valor lógico a las entradas del PLC.

La ventaja de usar optoacopladores es tener un aislamiento de la alimentación del PIC con el PLC, ya que el voltaje de las entradas del PLC son de 24 volts y si no existiera este acoplamiento se podría dañar el microcontrolador. Al circuito se les añadió LED's en las salidas y entradas del PLC para visualizar la activación de las electroválvulas, además de un botón de paro e inicio. En el capítulo siguiente se muestra la simulación en PROTEUS, el rutado en ARES y el código en MikroC se muestra en el capítulo 5.

A continuación en la figura 4.8 se muestra el diagrama del procesamiento de la señal de los sensores para las entradas digitales del PLC, en la figura se muestra el diagrama del procesamiento de la señal de los sensores acoplado al PLC.



**Figura 4.8. Diagrama procesamiento de la señal.**

#### Montaje final de sensores de distancia

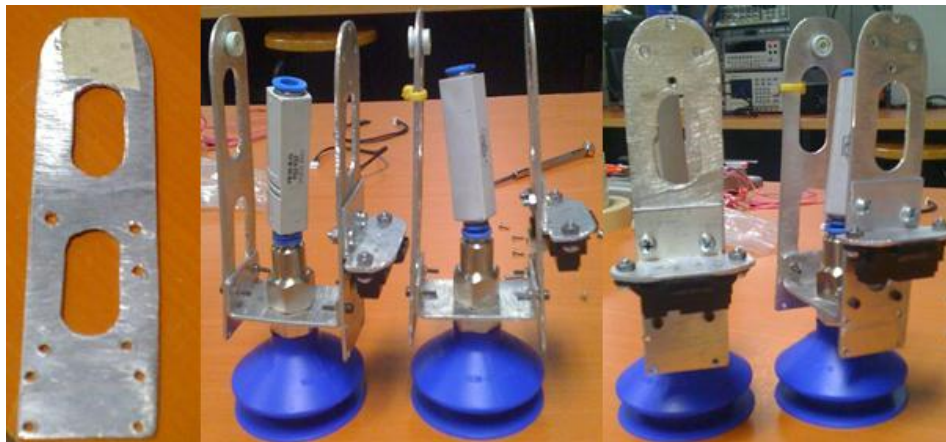
Para poder implementar los sensores de distancia DMS, se maquinaron dos piezas de aluminio, las cuales se midieron, cortaron y perforaron para poder montar un sensor en cada extremidad, se implementaron dos sensores ya que la locomoción es por triadas y solo se necesita un sensor para cada triada. En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se muestra el proceso de maquinado y ajuste a las extremidades.



**Figura 4.9. Corte del ángulo.**



**Figura 4.10. Ajuste del sensor.**



**Figura 4.11. Implementación de los sensores en cada extremidad.**

## 4.5. Parámetros de Denavit-Hartenberg

La extremidad del robot cuenta con tres articulaciones (Ver Figura 4.12), A partir del algoritmo de Denavit- Hartenberg se debe tener tres variables para el parámetro teta, es decir  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ , al momento de tener las ecuaciones a partir de estos tres parámetros, dichas ecuaciones no daban los resultados para las coordenadas del efector final, si a  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  se les daba valor de 0 en las ecuaciones, el vector de translación no correspondía a la posición del efector final (Ver Figura 4.13).

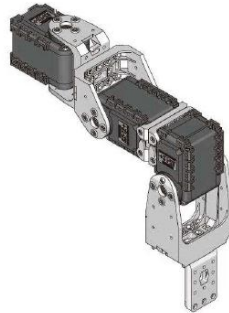


Figura 4.12. Extremidad con tres articulaciones.

Si  $q_1 = q_2 = q_3 = 0$ .

$$X = a_1 + a_3, \quad Y = 0, \quad Z = d_2 + d_4 + a_5$$

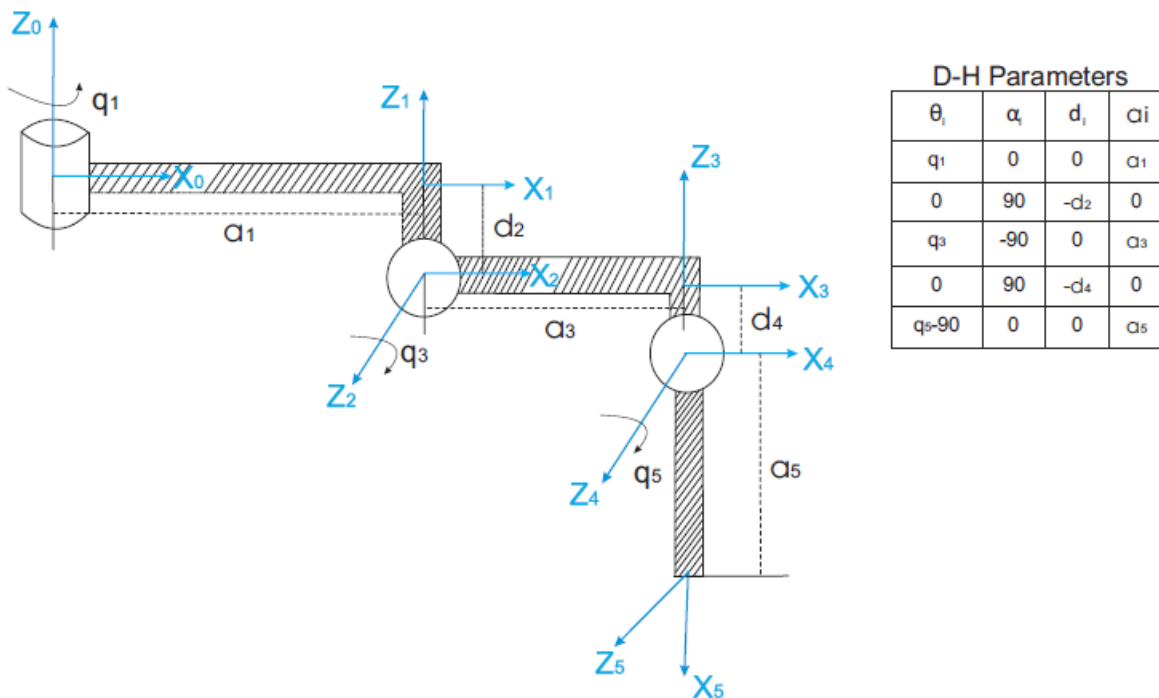


Figura 4.13. Parámetros Denavit-Hartenberg.

A partir de esta observación, se propuso agregar dos marcos de referencia ya que en las primeras ecuaciones se perdían las siguientes constantes  $a_3$  en el eje  $z$  y la variable  $q_2$  en el eje  $z$ , estos dos nuevos marcos de referencia no alteran el resultado ya que en el parámetro teta se les dio un valor de 0. Con los valores de los parámetros se sustituyó en las 5 matrices debido a que son 5 marcos de referencia para obtener la matriz  $T$ , esto se hizo con ayuda de Matlab. En el código se fijaron todos los parámetros como variables debido a que constantemente se cambió el valor de los parámetros, esto se hizo para no sobrescribir las matrices con cada cambio, el código se localiza en el anexo B.

Las ecuaciones finales son las siguientes:

$$T_5^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Las ecuaciones finales son las siguientes:

$$\begin{aligned} n_x &= C_4 C_5 (C_1 C_2 C_3 - C_3 S_1 S_2) - C_5 S_4 (C_1 S_2 + C_2 S_1) - S_5 (C_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 S_3) \\ n_y &= C_4 C_5 (C_1 C_3 S_2 + C_2 C_3 S_1) - C_5 S_4 (S_1 S_2 - C_1 C_2) - S_5 (C_1 S_2 S_3 + C_2 S_1 S_3) \\ n_z &= C_3 S_5 + C_4 C_5 S_3 \\ o_x &= S_4 S_5 (C_1 S_2 + C_2 S_1) - C_5 (C_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 S_3) - C_4 S_5 (C_1 C_2 C_3 - C_3 S_1 S_2) \\ o_y &= S_4 S_5 (S_1 S_2 - C_1 C_2) - C_5 (C_1 S_2 S_3 + C_2 S_1 S_3) - C_4 S_5 (C_1 C_3 S_2 + C_2 C_3 S_1) \\ o_z &= C_3 C_5 - C_4 S_3 S_5 \\ a_x &= S_4 (C_1 C_2 C_3 - C_3 S_1 S_2) + C_4 (C_1 S_2 + C_2 S_1) \\ a_y &= S_4 (C_1 C_3 S_2 + C_2 C_3 S_1) + C_4 (S_1 S_2 - C_1 C_2) \\ a_z &= S_3 S_4 \\ p_x &= C_1 a_1 + (d_4 - S_5 a_5) (C_1 C_2 S_3 - S_1 S_2 S_3) + C_4 C_5 a_5 (C_1 C_2 C_3 - C_3 S_1 S_2) + C_1 C_2 C_3 a_3 - C_5 S_4 a_5 (C_1 S_2 + C_2 S_1) - C_3 S_1 S_2 a_3 \\ p_y &= S_1 a_1 + (d_4 - S_5 a_5) (C_1 S_2 S_3 + C_2 S_1 S_3) + C_4 C_5 a_5 (C_1 C_3 S_2 + C_2 C_3 S_1) + C_1 C_3 S_2 a_3 + C_2 C_3 S_1 a_3 - C_5 S_4 a_5 (S_1 S_2 - C_1 C_2) \\ p_z &= S_3 a_3 - d_2 - C_3 (d_4 - S_5 a_5) + C_4 C_5 S_3 a_5 \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $C_j = \cos(q_j)$   $S_j = \text{Sen}(q_j)$



#### **4.6. Validación de la cinemática directa por medio de Calibración de Cámara.**

La extremidad cuenta con tres grados de libertad, a partir de la solución de la cinemática directa se puede encontrar la ubicación del efector en el espacio con respecto al tórax del robot si se conoce la posición angular de los tres motores.

El experimento consistió en que la extremidad realizará tres diferentes trayectorias, en las cuales los tres motores tuvieran un aumento conocido en su posición angular, y con estos mismos valores angulares poder ingresarlos a las ecuaciones de la cinemática directa para obtener la posición en el espacio del efector final y comprobar si estos dos resultados coincidían.

La finalidad de este experimento es conocer la posición del efector final de cada punto de la trayectoria de acuerdo con la cinemática directa y encontrar la posición del efector final de manera experimental mediante la calibración de cámara la cual gracias a un patrón de ajedrez se puede saber la pose del mismo y así conocer la posición del efector final en cada punto, para después hacer la comparación entre lo teórico y lo experimental.

Se validó la cinemática directa del efector final de una extremidad, para esto se realizó la calibración de la cámara con el Toolbox de Matlab, para encontrar las coordenadas exactas desde la posición inicial y final del efector final, este método es muy preciso en cuanto a conocer la pose (orientación y posición) de un objeto, ya que por medio de la calibración, el algoritmo puede calcular los datos intrínsecos de la cámara como son la distorsión, distancia focal, la desviación y el error en píxeles.

Con la cinemática directa de una de las extremidades del robot, la Maestra Yamile Sandoval realizó un artículo en base a la validación de la cinemática directa, para poder ser publicado en el CIIICC Conferencia Iberoamericana en Ingeniería Electrónica y Ciencias de la Computación, en la ciudad de San Luis Potosí, marzo 2013. Con todo esto se realizó la colaboración en la redacción en la parte de validación de la cinemática, explicando el método de Calibración de Cámara para Matlab, los pasos a seguir para la calibración y los resultados de la misma.

Para la calibración se necesitan tomar al menos 20 imágenes del patrón con distintas orientaciones y distancias hacia la cámara, abarcando todo el campo de visión de la misma, con las 20 imágenes se llevó a procesarlas en Matlab, por cada imagen manualmente se tienen que seleccionar las 4 esquinas del patrón y el algoritmo detecta automáticamente las esquinas de todo el cuadrículado, entre más cerca encuentre las esquinas del punto real de la imagen mejor será la calibración y el error en píxeles será pequeño.

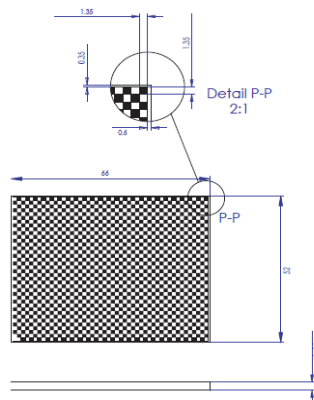
Este método analiza las imágenes del movimiento de un objeto, arroja un vector de traslación y una matriz de rotación por cada imagen, esta matriz y vector necesitan ser transformadas para conocer la pose del punto de referencia del patrón.

Se utilizó una cámara USB CMOS, como se muestra en la Figura 4.14, modelo DFk-72AUC02, con lentes de 8 mega pixeles modelo M0814-MP2, ambas de la compañía IMAGING SOURCE. El software para adquirir las imágenes es IC-CAPTURE versión 2.2 de la misma compañía.



**Figura 4.14. Cámara DFk-72AUC02.** [10]

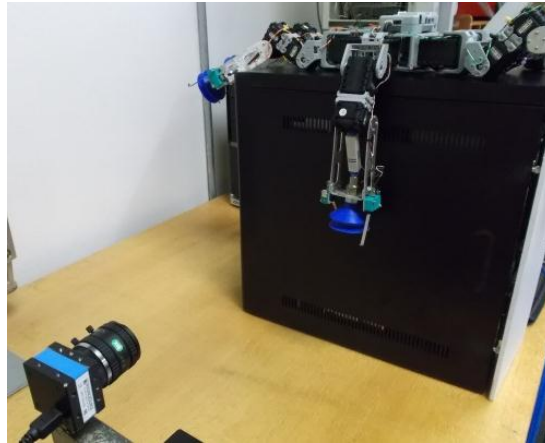
El patrón que se utilizó, fue un patrón comercial, el cual es un vidrio con el patrón impreso, cada cuadro mide 1.35 x 1.35 mm.



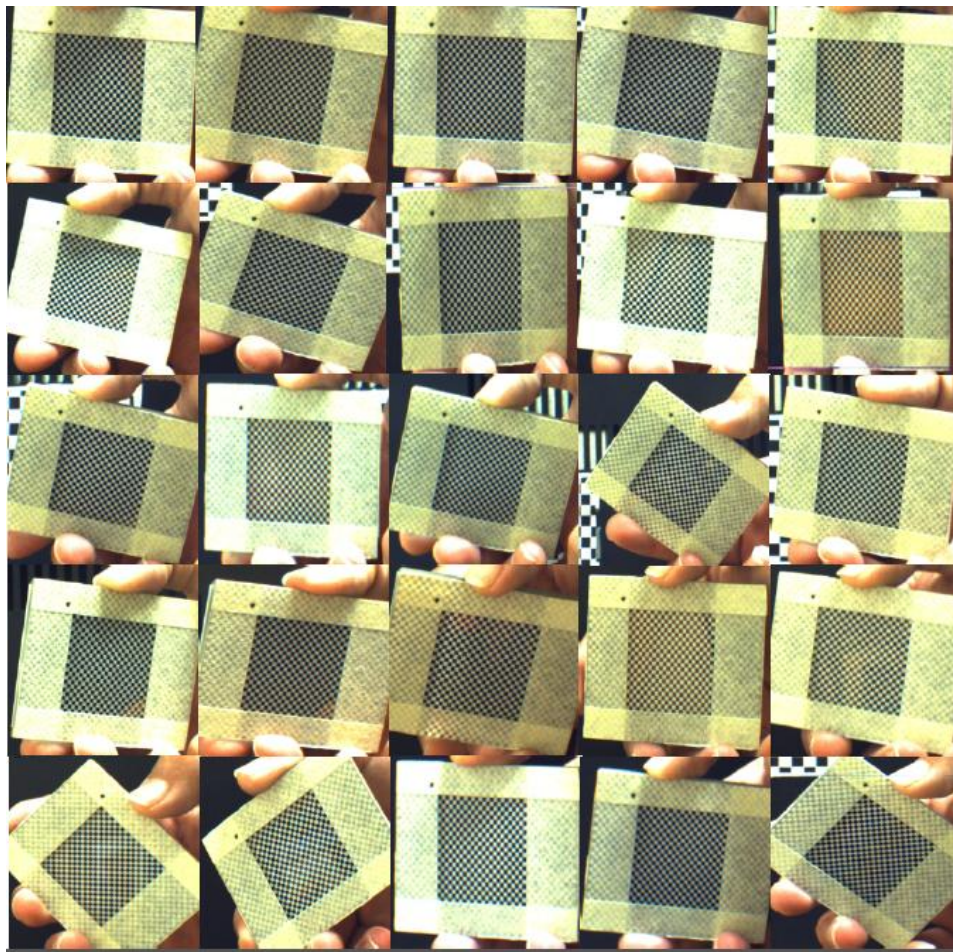
**Figura 4.15. Dimensiones del patrón.** [11]

En la Figura 4.16 se muestra el montaje de la cámara con respecto a la extremidad del robot, la resolución de la cámara se ajustó a 2256 x 1504 pixeles. Se tomaron 40 fotos para calibrar la cámara, moviendo el patrón manualmente con diferentes orientaciones, abarcando toda la visión de la cámara.

Las fotografías para la calibración fueron 25 ya que se desecharon las borrosas, es decir, muy claras y oscuras debido a que el algoritmo no podría detectar perfectamente las esquinas. Las imágenes de la calibración se muestran en la Figura 4.17.



**Figura 4.16. Montaje de la cámara.**



**Figura 4.17. Fotografías de calibración.**

La extremidad cuenta con 3 motores, a esta se le programaron 5 trayectorias muestreando 11 puntos por cada trayectoria. Por cada punto se tomó una fotografía y de las 5 trayectorias se hicieron 6 repeticiones, teniendo en total 355 fotografías. Se verificó la calidad de las imágenes, procurando que el patrón tenga una buena resolución en cada fotografía. En la figura 4.18 se muestran las imágenes de la primera trayectoria.

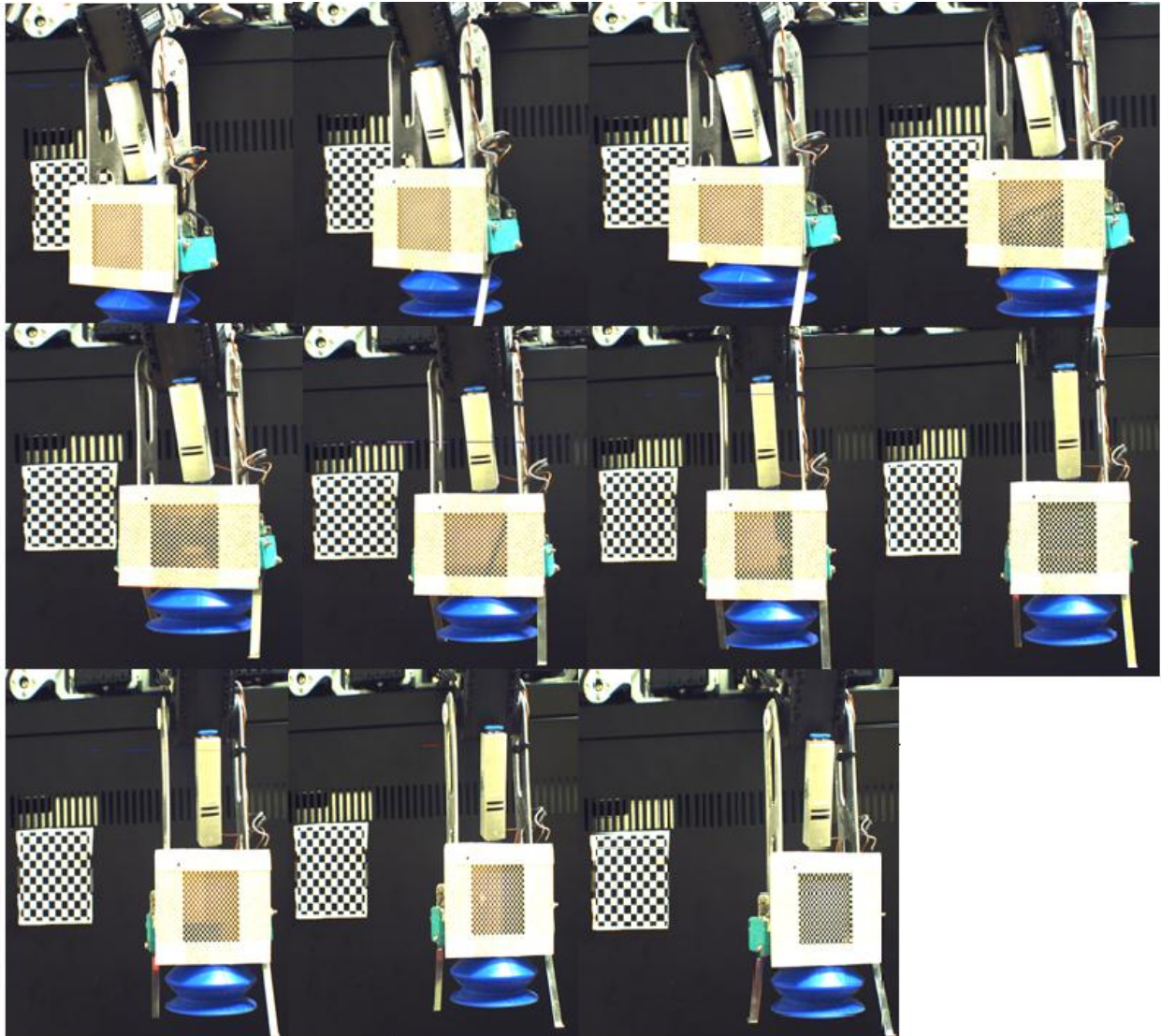


Figura 4.18. Fotografías de la primera trayectoria.



## Extracción de esquinas (calibración)

El método exige seleccionar cada esquina del patrón en la imagen, empezando siempre en un origen para todas las imágenes, el nuestro se encuentra en la parte superior izquierda del patrón. (Ver Figura 4.19). Esto se hizo para las 40 imágenes tomadas y dependiendo del resultado final de la calibración se desecharon 15 imágenes que arrojaban un error no permitido, el error en pixeles tiene que ser menor de 0.1. La ventaja del método es que permite saber cuál de las imágenes contiene un error alto, es decir, en el cual el método no alcanza a detectar las esquinas del patrón. En la Tabla 4.3 se muestra el resultado de la calibración.

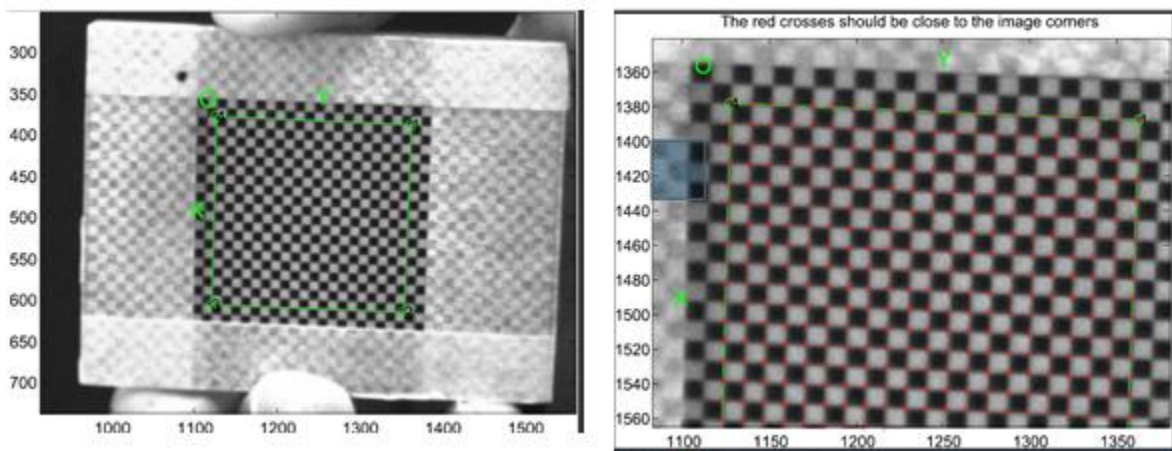


Figura 4.19. Detección de esquinas.

Tabla 4.3. Parámetros intrínsecos de la cámara.

Parámetros intrínsecos				
Longitud focal	$\alpha$		$\beta$	
	3874.97		3869.38	
Punto principal	$U_0$		$V_0$	
	1387.79		941.13	
Desviación	$\gamma$			
	90°			
Distorsión	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
	-0.12241	0.33533	-0.00125	-0.00043
Error en pixeles	$X$		$Y$	
	0.13565		0.14714	

Se obtuvo un error de 0.13 pixeles en X y en Y de 0.14 pixeles

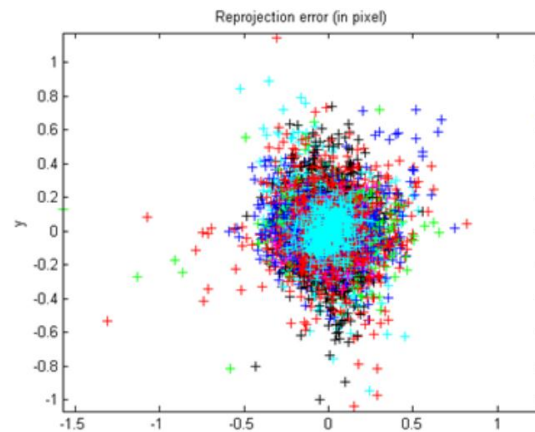


Figura 4.20. Gráfica de error en la calibración.

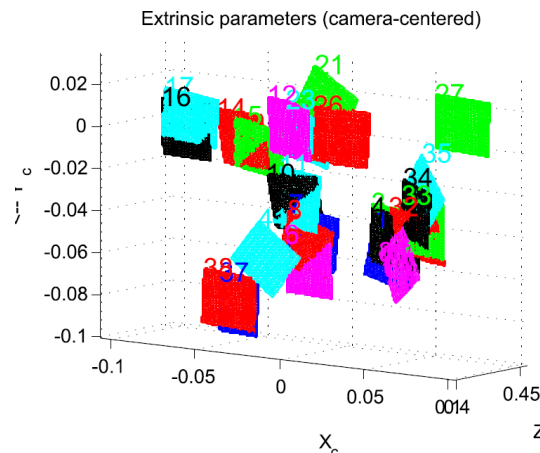


Figura 4.21. Proyección del patrón visto desde el marco de referencia de la cámara.

En la Figura 4.20 muestra el error de calibración, cada color de la imagen equivale al error de una de las fotos, la Figura 4.21 se muestra la orientación y posición de cada imagen de la calibración vista desde la cámara.

A partir de la calibración, se analizó cada imagen de las trayectorias, originalmente eran 5 trayectorias con 6 repeticiones pero cuando se analizó la trayectoria 4 y 5 surgieron errores en pixeles entre 0.5 a 0.8 en casi todas las imágenes de estas trayectorias, debido al movimiento de estas trayectorias la luz que incide en el patrón provoca que los cuadros no sean distinguibles para Matlab, por lo cual esas dos trayectorias se eliminaron y se trabajó con la 1,2 y 3.

En la Figura 4.22 se muestra el análisis de una sola imagen, se seleccionan las cuatro esquinas y se verifica que el error este dentro de lo permitido, ver tabla 4.4.

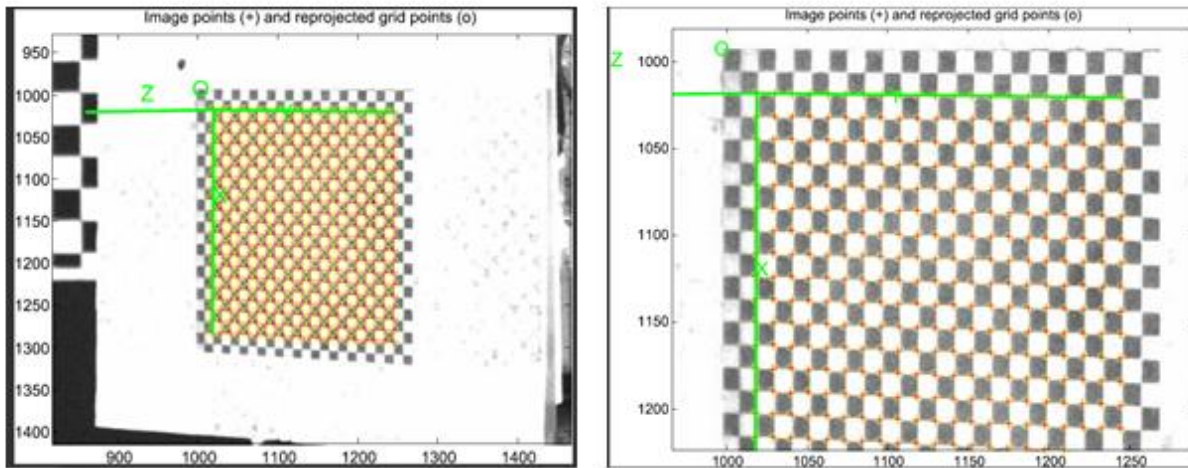


Figura 4.22. Extracción de esquinas de las imágenes de las trayectorias.

Tabla 4.4. Parámetros extrínsecos de una imagen.

Parámetros extrínsecos de una imagen:	
Vector de traslación:	$Tc\_ext = [-28.781875, 8.447298, 394.662391]$
Vector de rotación:	$omc\_ext = [-1.981524, -1.957472, 0.384093]$
Matriz de rotación:	$Rc\_ext = [0.020464, 0.910558, -0.412875$
	$0.999062, -0.002857, 0.043217$
	$0.038172, -0.413372, -0.909762]$
Error en pixeles:	$err = [0.009971, 0.09404]$

Se guardaron todos los parámetros de cada imagen en un txt, estos parámetros son el vector de traslación, vector de rotación y la matriz de rotación, en este caso no se toma en cuenta el error ya que se aseguró que estuviera dentro de lo permitido.

A partir de tener 6 archivos txt de cada trayectoria, se hizo un promedio en Matlab para cada valor de los vectores y matrices de cada trayectoria para comprobar la repetitividad de la cinemática directa de una extremidad. Estos valores después se compararon con los valores de la cinemática directa. Se obtuvieron tres promedios.

## Comparación de resultados

A partir de las ecuaciones de la cinemática directa, se tiene una matriz de transformación homogénea en la cual solo son de interés las ecuaciones del vector de traslación (Px, Py, Pz) del efector final para cada punto de cada trayectoria, para poder hacer las comparaciones con el vector de traslación del método experimental. Así como en el método experimental y el método teórico, se ingresaron los mismos ángulos para cada punto de las trayectorias.

Para poder hacer la comparación de los resultados de la cinemática directa y la validación de cámara se llegó a obtener la norma de un punto  $i$  a un punto  $i-1$ .

Esto se hizo debido a que los valores del vector de traslación del método experimental y el método teórico no son los mismos porque estos tienen diferentes marcos de referencia. El marco de referencia de la cinemática directa corresponde al tórax del robot y el marco de referencia del método experimental corresponde al visto desde la cámara.

La norma de un vector se define como la distancia en línea recta entre dos puntos A y B que delimitan dicho vector, en un espacio euclideo la norma de un vector coincide con el módulo del vector  $\vec{AB}$ .

En dos dimensiones:

$\|\vec{AB}\| = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2}$  Siendo  $\vec{OA} = (a_1, a_2)$  y  $\vec{OB} = (b_1, b_2)$  y O el origen de coordenadas de dicho espacio.

En el caso general de un espacio euclideo de n dimensiones se tiene:

$\|\vec{AB}\| = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + (b_2 - a_2)^2 + \dots + (b_n - a_n)^2}$  Siendo  $\vec{OA} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  y  $\vec{OB} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$

Los vectores de traslación son de tres dimensiones, por lo cual se obtuvo la posición final (x,y,z) de cada punto de las trayectorias, se obtuvo la norma para estos puntos y así sabiendo el desplazamiento del punto  $i$  a un punto  $i-1$ , poder compararlo con la norma de la validación experimental. Estos cálculos se realizaron con Matlab. Se adjunta el código en el anexo I, el cual va cambiando el valor de q1, q2 y q3 según la trayectoria y así se obtiene los vectores de traslación de cada punto, para después restar el punto  $i$  a un punto  $i-1$  y hacer la operación para encontrar la norma, los valores del vector de traslación, la norma y valores de q1, q2 y q3 se fueron guardando en un archivo txt, para poder manejarlos fácilmente.

A partir de estos vectores de traslación se graficaron las tres trayectorias, las cuales se anexan en el capítulo 5.



#### 4.7. Locomoción del robot hexápodo.

El robot hexápodo tiene una configuración tipo radial, por la cual permite hacer giros con mayor facilidad que en una configuración bilateral, revisando la literatura de locomoción de insectos, se llegó a las siguientes conclusiones.

Después de una búsqueda exhaustiva de literatura sobre robots e insectos escaladores, se encontró muy poca información, debido a que la locomoción de los insectos sobre la superficie horizontal es diferente a la locomoción que se busca, ya que se tiene que asegurar la estabilidad del robot y evitar que sufra una caída.

La locomoción tipo hormiga no se puede implementar ya que el espacio de trabajo de cada extremidad no es idéntico y cabe mencionar que el compilador de movimientos del robot nos permite realizar exclusivamente 7 pasos, porque es imposible aumentar el número de pasos o saltar de una secuencia a otra automáticamente.

Con respecto a la locomoción de la araña no se puede aplicar, debido a que cuenta con ocho extremidades y no todas idénticas, sus dos patas superiores son más largas que las otras y esto le permite desplazarse distancias relativamente largas.

La locomoción que se estuvo desarrollando consistió en hacer uso de triadas, es decir, enumerar las extremidades como en la Figura 4.23 y hacer dos divisiones de las extremidades.

La primera triada está conformada por la extremidad 1,3 y 5. La segunda triada la complementan las extremidades restantes 2,4 y 6.

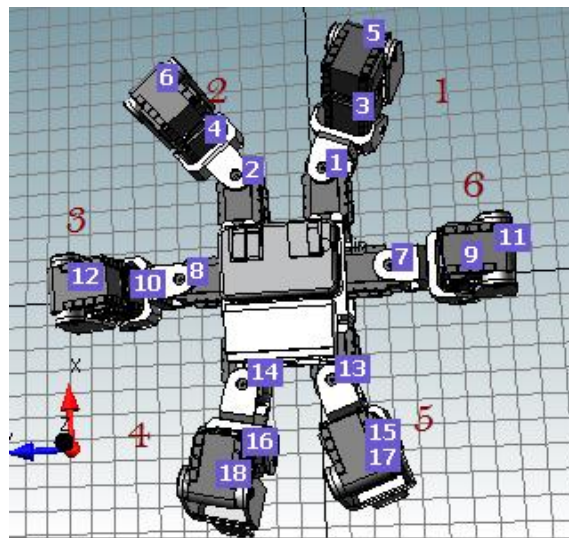
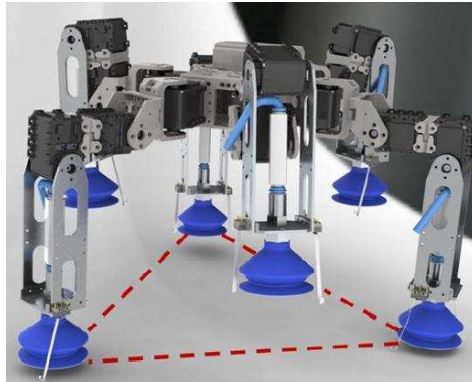


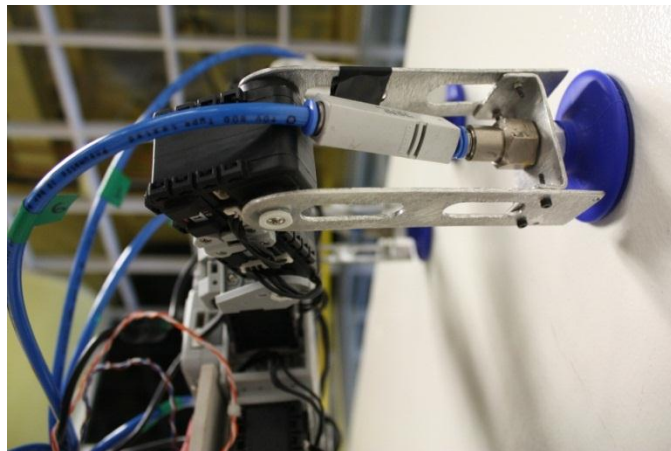
Figura 4.23. Enumeración de las extremidades.

Esto con la finalidad de mantener la estabilidad del robot, porque al tener un polígono en las extremidades con las que se sostiene se asegura que el robot no caiga, el polígono se muestra en la Figura 4.24.



**Figura 4.24. Polígono de estabilidad.**

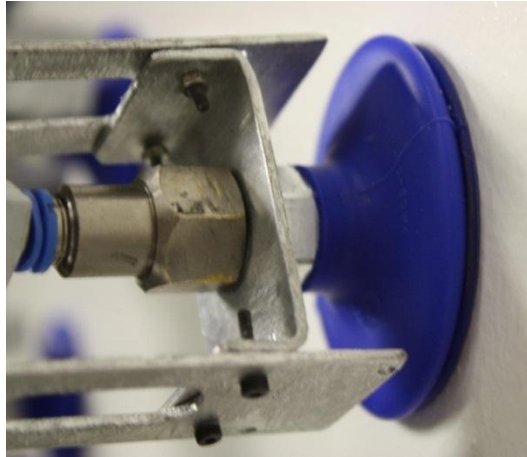
El desplazamiento del robot en superficies verticales no abarca una gran distancia en una sola secuencia de pasos, ya que cada extremidad no puede desplazarse demasiado, porque nos encontramos limitados a la adherencia de cada extremidad.



**Figura 4.25. Succión de aire de una extremidad.**

Para adherir la extremidad a la pared, cada efector final debe estar perpendicular a la superficie vertical, como se muestra en la Figura 4.25, de otra manera se perdería el control del robot y así provocar la caída del mismo.

Cuando la succión de aire ocurre, como se observa en la Figura 4.26, se obtiene una diferente posición en z del robot, ya que esta se desplaza en el cuadro negativo z. Por lo cual la posición angular de cada motor se fue probando con el sistema de succión activado.



**Figura 4.26. Succión de aire de la ventosa.**

## Capítulo V. Resultados

### 5.1. Resultados de la cinemática directa

En las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran los resultados de la cinemática directa y las variaciones en grados de  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  según las trayectorias.

**Tabla 5.1. Resultados primer trayectoria.**

Primer trayectoria						
Posición	Parámetro teta (Grados)			Posición efector final		
	q1	q2	q3	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	-25	-25	-65	97.428	-45.431	-181.29
1	-20	-25	-65	101.017	-36.767	-181.29
2	-15	-25	-65	103.837	-27.823	-181.29
3	-10	-25	-65	105.867	-18.667	-181.29
4	-5	-25	-65	107.091	-93.692	-181.29
5	0	-25	-65	107.5	0	-181.29
6	5	-25	-65	107.091	93.692	-181.29
7	10	-25	-65	105.867	18.667	-181.29
8	15	-25	-65	103.837	27.823	-181.29
9	20	-25	-65	101.017	36.767	-181.29
10	25	-25	-65	97.428	45.431	-181.29

**Tabla 5.2. Resultados segunda trayectoria.**

Segunda trayectoria						
Posición	Parámetro teta (Grados)			Posición efector final		
	q1	q2	q3	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	-25	-25	-65	97.428	-45.431	-181.29
1	-20	-23	-65	105.671	-38.461	-179.462
2	-15	-21	-65	113.341	-30.369	-177.462
3	-10	-19	-65	120.297	-21.211	-175.29
4	-5	-17	-65	126.404	-11.058	-172.957
5	0	-15	-65	131.537	0	-170.457
6	5	-13	-65	135.58	11.861	-167.797
7	10	-11	-65	138.427	24.408	-164.979
8	15	-9	-65	139.987	37.509	-162.007
9	20	-7	-65	140.186	51.023	-158.88
10	25	-5	-65	138.963	64.799	-181.29

**Tabla 5.3. Resultados tercera trayectoria.**

Tercera trayectoria						
Posición	Parámetro teta (Grados)			Posición efector final		
	q1	q2	q3	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	-25	-65	-65	97.428	-45.431	-181.29
1	-20	-65	-67	97.911	-35.636	-181.23
2	-15	-65	-69	97.456	-26.113	-181.059
3	-10	-65	-71	96.118	-16.948	-180.771
4	-5	-65	-73	93.961	-8.22	-180.368
5	0	-65	-75	91.056	0	-179.851
6	5	-65	-77	135.58	7.653	-179.22
7	10	-65	-79	138.427	14.688	-178.477
8	15	-65	-81	139.987	21.067	-177.621
9	20	-65	-83	140.186	26.758	-176.655
10	25	-65	-85	138.963	31.743	-175.579

### 5.1.1. Comparación de resultados

Se obtuvieron 10 normas para cada trayectoria tanto para la cinemática directa y la técnica de calibración de cámara, se muestran en las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 los resultados de cada trayectoria y con el error en cada comparación.

**Tabla 5.4. Tabla de resultados de la primera trayectoria.**

Primer trayectoria			
Punto	Norma Cinemática (mm)	Norma Cámara (mm)	Error
1	9.378	10.172	0.794
2	9.378	8.657	0.721
3	9.378	10.107	0.729
4	9.378	10.158	0.78
5	9.378	8.704	0.674
6	9.378	9.237	0.141
7	9.378	10.564	1.186
8	9.378	8.522	0.856
9	9.378	10.04	0.662
10	9.378	9.855	0.477

**Tabla 5.5. Tabla de resultados de la segunda trayectoria.**

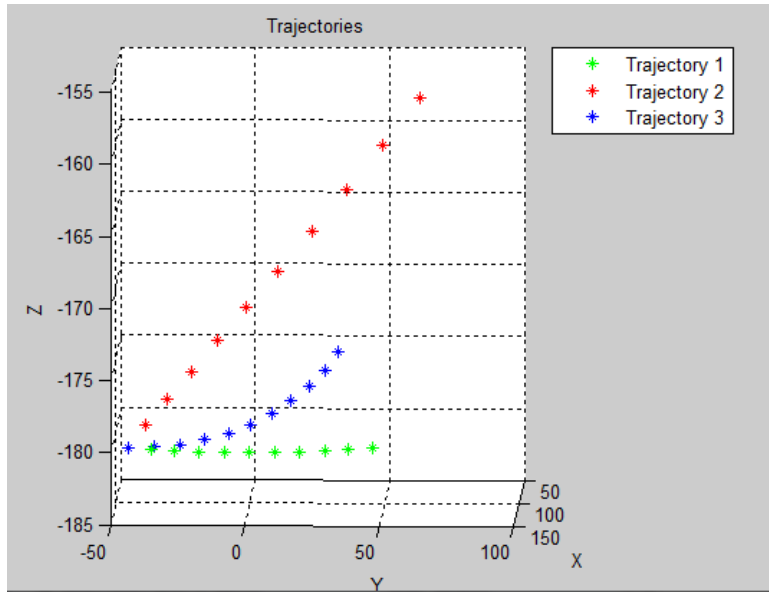
Segunda trayectoria			
Punto	Norma Cinemática (mm)	Norma Cámara (mm)	Error
1	10.948	11.691	0.743
2	11.326	10.459	0.867
3	11.702	12.51	0.808
4	12.076	12.32	0.244
5	12.445	11.12	1.325
6	12.81	12.804	0.006
7	13.17	13.172	0.002
8	13.524	11.26	2.264
9	13.871	13.962	0.091
10	14.211	14.04	0.171

**Tabla 5.6. Tabla de resultados de la tercera trayectoria**

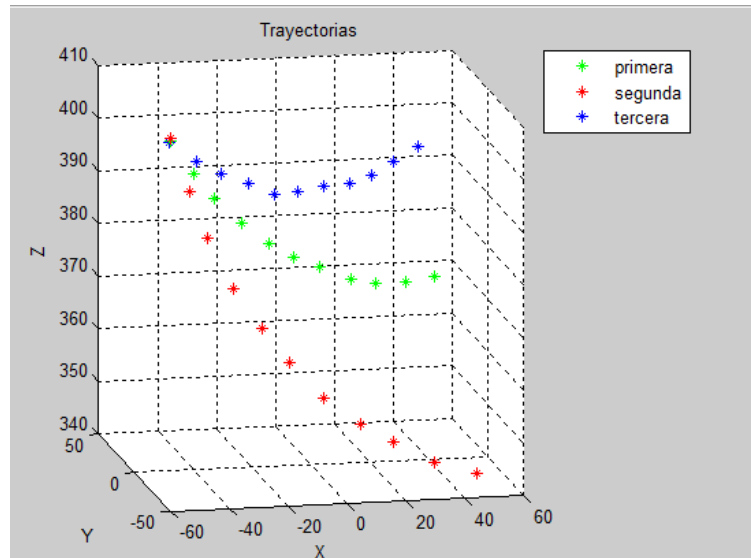
Tercer trayectoria			
Punto	Norma Cinemática (mm)	Norma Cámara (mm)	Error
1	9.806	10.176	0.37
2	9.535	8.408	1.127
3	9.266	9.733	0.467
4	8.999	9.304	0.305
5	8.734	7.676	1.058
6	8.472	8.889	0.417
7	8.213	8.841	0.628
8	7.957	7.425	0.532
9	7.706	7.958	0.252
10	7.459	8.411	0.952

Los resultados de los errores son muy buenos, cabe mencionar que este error esta dado en mm tanto para la norma de la cinemática y la norma de la cámara, para así validar la cinemática directa de una extremidad del robot hexápodo. Con la ayuda de Matlab se graficaron los vectores de traslación del promedio de cada punto de las trayectorias obtenidas de la técnica de calibración de cámara y también se muestran las gráficas de los vectores de traslación de la cinemática directa.

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran las gráficas de las trayectorias del desarrollo experimental y teórico, estas graficas resultan muy parecidas, aunque hay que tener presente que las dos corresponden a marcos de referencia diferentes, por lo tanto los vectores de traslación y la matriz de rotación son diferentes.



**Figura 5.1. Trayectorias calibración de cámara.**



**Figura 5.2. Trayectorias cinemática directa.**

## 5.2. Simulación de la placa de instrumentación.

Antes de realizar la placa de instrumentación, se realizó la simulación de la misma para asegurar el funcionamiento del circuito, con la ayuda de PROTEUS, como se muestra en la Figura 5.4. Además se realizó el rutado de la misma en la Figura 5.5 y 5.6. El montaje final del sensor se observa en la Figura 5.3. Los sensores dieron un resultado rápido y confiable al tocar la superficie vertical.

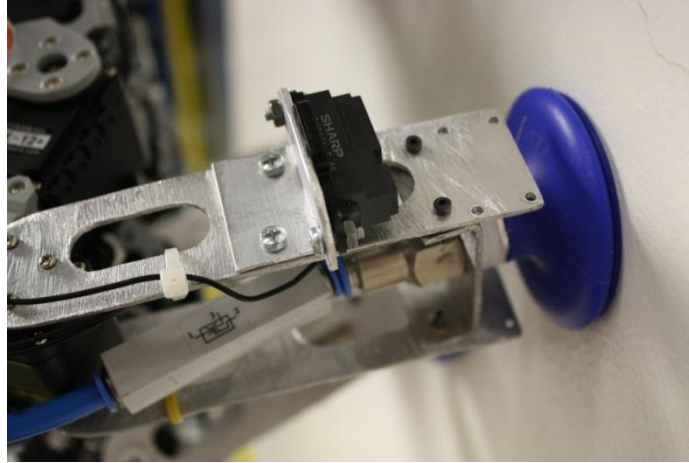


Figura 5.3. Montaje final del sensor.

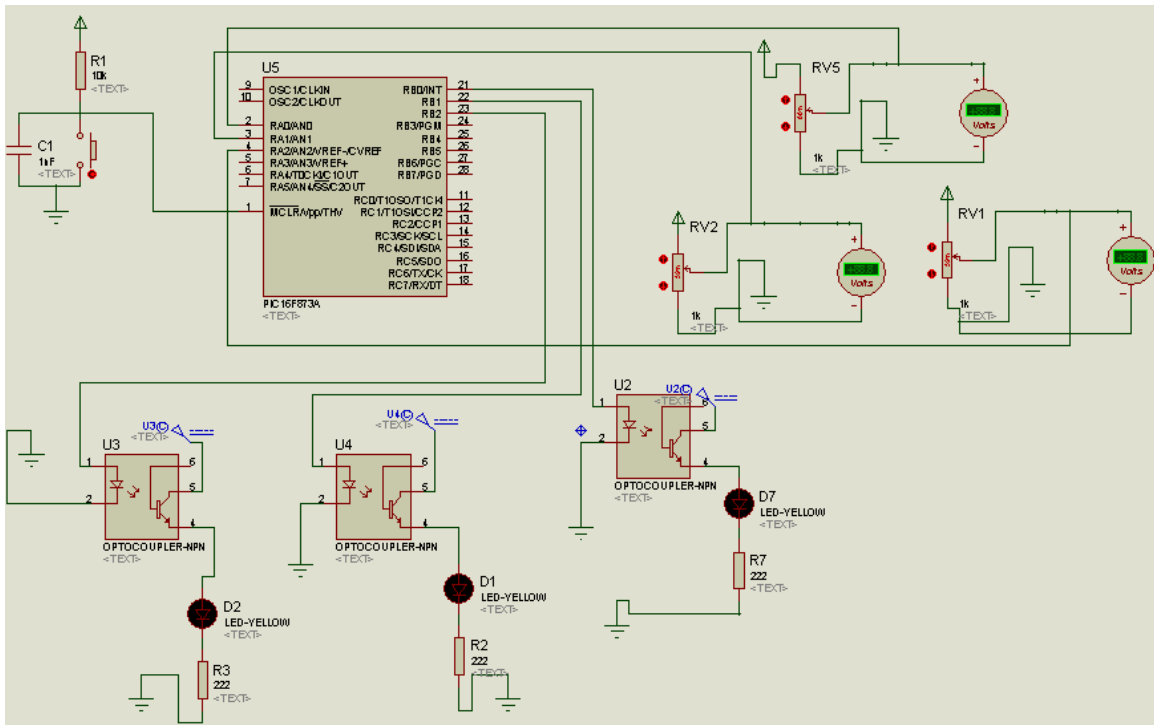


Figura 5.4. Simulación del circuito.



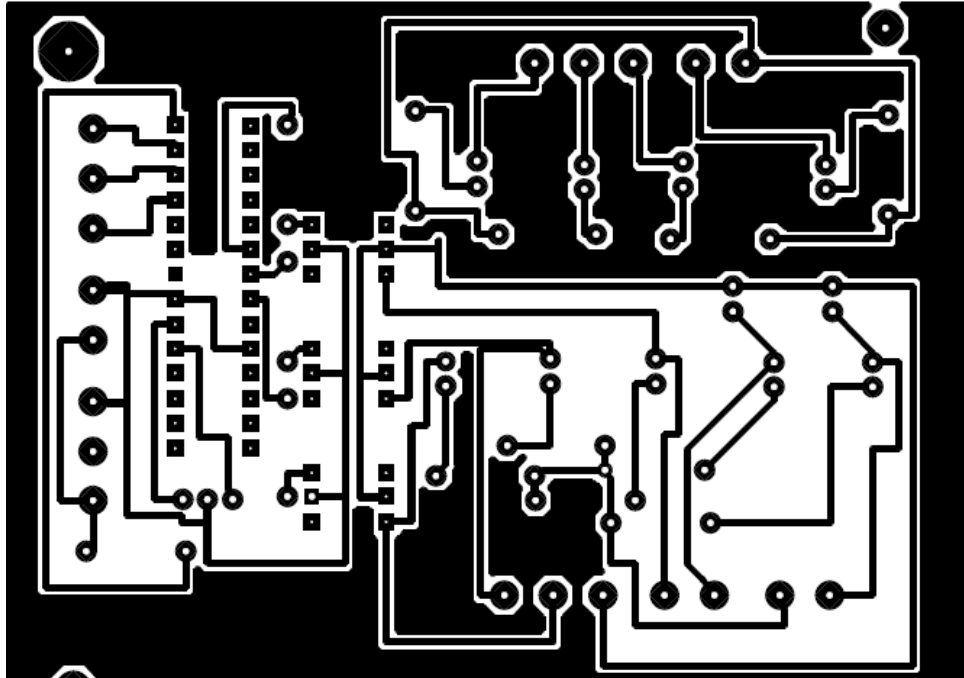


Figura 5.5. Rutado final.

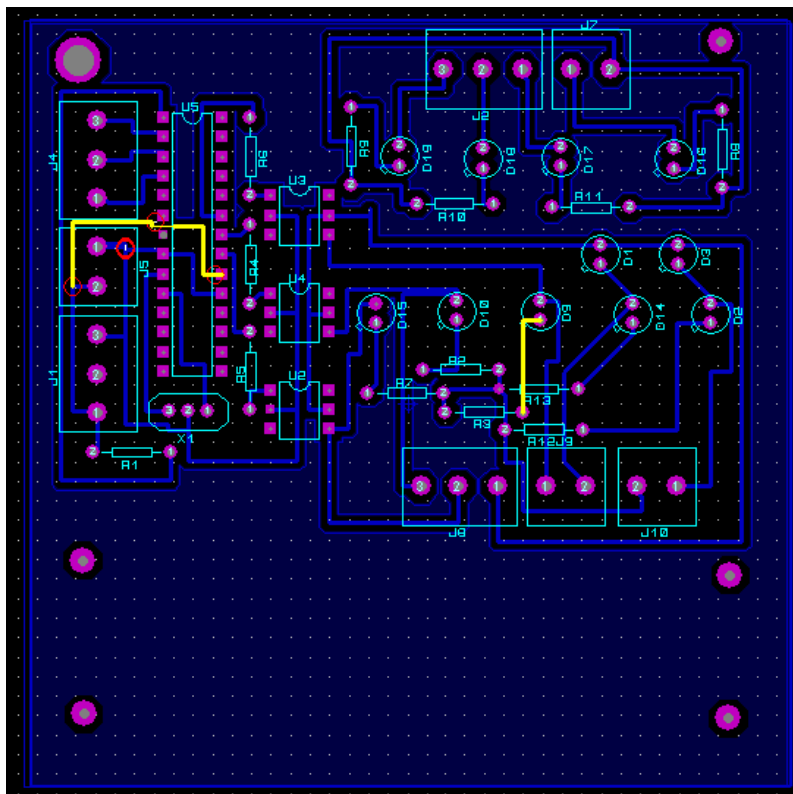


Figura 5.6. Conexiones del circuito.

### 5.3. Desarrollo del algoritmo de locomoción.

La locomoción se probó en una superficie horizontal aunque no es la misma situación ya que debido a la gravedad la elevación del robot cambia cuando se le aplica el aire comprimido y esto hace que los ángulos de los motores cambien y no peguen completamente a la superficie. Después se pasó la locomoción a una superficie vertical y se hicieron los ajustes en los ángulos de los motores. Los problemas que se tuvieron fue el peso del robot, ya que es necesario que todos los motores tengan la fuerza necesaria para sostener el peso y no resbalar sobre la pared. En la figura 5.7 se muestra el diagrama de la secuencia de los siete pasos de la locomoción, posteriormente se explica.

La locomoción consistió:

Paso 1: la triada 1 se encuentra elevada y hace un desplazamiento en las tres extremidades correspondientes, la triada 2 sostiene el robot con la succión de aire.

Paso 2: la triada 2 se mantiene sosteniendo al robot, la triada 1 se posiciona en la superficie vertical.

Paso 3: ambas triadas succionan.

Paso 4: la triada 1 sostiene el robot con la succión, mientras tanto la triada 2 eleva sus extremidades sin la activación de la succión.

Paso 5: La triada 1 sigue sosteniendo al robot y la triada 2 se encarga de desplazar sus extremidades hacia la dirección de la marcha.

Paso 6: La triada 2 se posiciona sobre la superficie vertical, la triada 1 sigue succionando.

Paso 7: Ambas triadas succionan, al término del séptimo paso comienza el paso número uno.

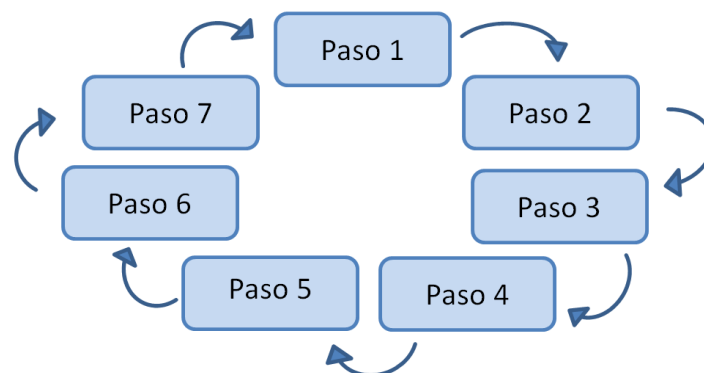


Figura 5.7. Diagrama secuencia de pasos.

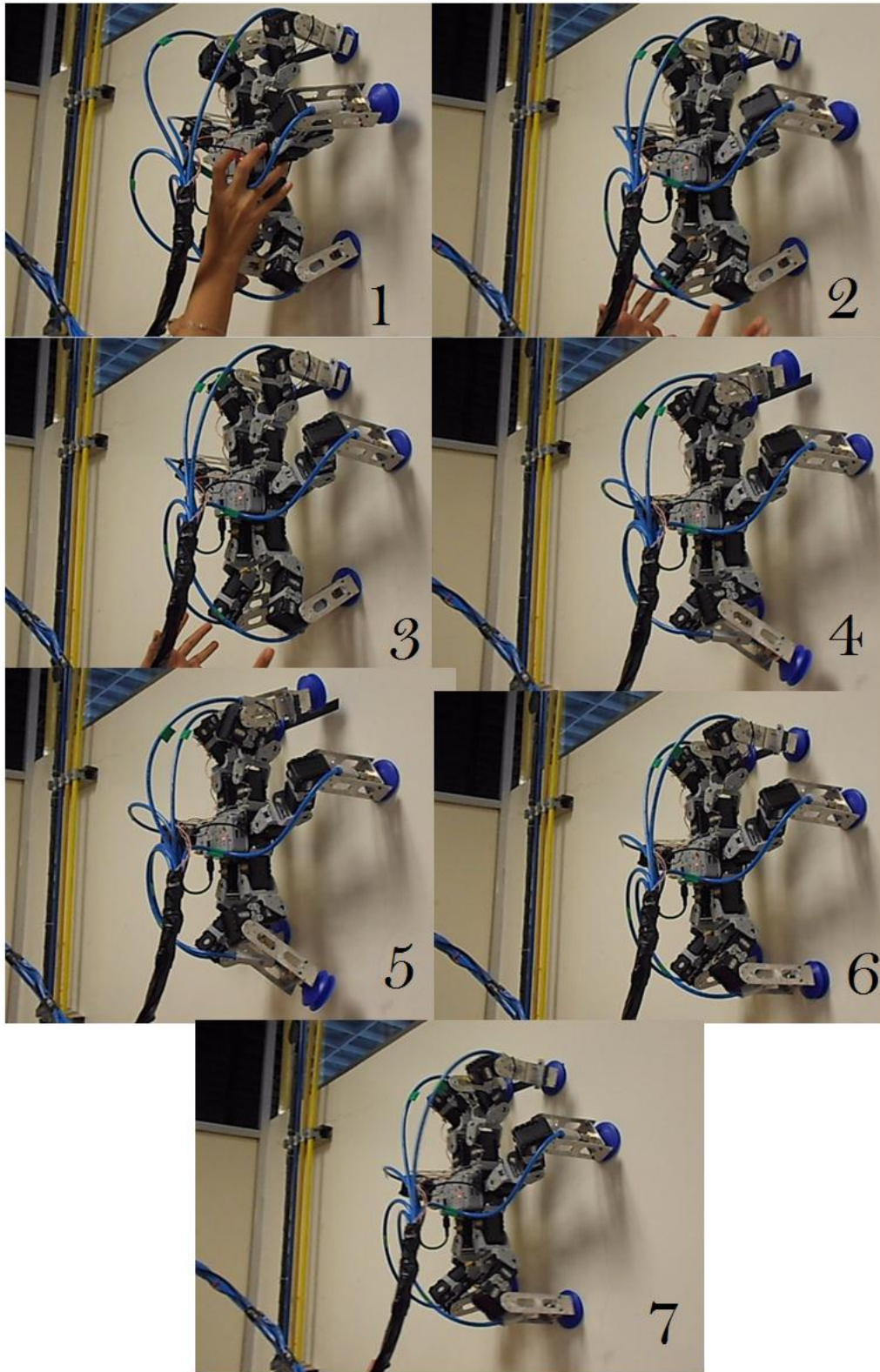


Figura 5.8. Secuencia de pasos.

En la Figura 5.8 se muestra el avance de la locomoción del robot en una superficie vertical. Se sincronizó el programa del PLC con la locomoción del mismo, además de encontrar la posición del efector final para que esta se encuentre perpendicular a la superficie adherida, además de que esta locomoción es solo para superficies planas, ya que si se cambia el tipo de superficie vertical, la locomoción cambiaría porque los seis efectores finales cambiarían su posición en el espacio.

#### Sincronización sistema neumático y locomoción

El programa del PLC hace uso de temporizadores y consta de dos entradas digitales, las cuales corresponden al sensor que tienen cada una de las triadas, este programa estará siempre leyendo las entradas digitales y el programa se ejecuta hasta que el sensor de la primera triada mande una señal al PLC, esto ocurre cuando se posiciona el robot en la pared y el sensor de la primera triada detecta la superficie vertical. A la tarjeta controladora del robot se le programó la activación de uno de sus botones, que cuando sea oprimido el botón empiece a ejecutarse la locomoción, este botón se oprimirá en el momento en que se coloque al robot en la pared y así nos aseguramos que ambos programas se ejecuten al mismo tiempo.

## **Conclusiones**

El diseño del algoritmo consistió en el uso de triadas, es decir, dividir las extremidades en grupos de tres, todo esto para formar un polígono con las triadas y así asegurar la estabilidad del robot en la locomoción y evitar que en algún momento pudiera caerse, a pesar del peso del robot de más de 2 kilos, el hexápodo puede sostenerse en la superficie vertical. La locomoción es exclusiva para superficies lisas ya que para superficies irregulares se necesita que los motores se posicionen de manera diferente para alcanzar la vertical irregular.

Se hicieron pruebas físicas con el sensor inclinómetro, en avances futuros este sensor se implementará en el tórax del robot, esto para saber la orientación del mismo y así ubicar al tórax del robot al momento de la exploración de superficies.

En la instrumentación del robot, se implementaron sensores de distancia en cada triada, estos son precisos, actúan de una manera rápida y eficaz que ayudan a la locomoción del robot hexápodo, estos sensores se comunican directamente con el programa del PLC para la activación de las electroválvulas respectivamente.

La validación de la cinemática directa de una extremidad del robot arrojó excelentes resultados, gracias a la técnica de calibración de cámara, ya que es un método muy usado, que ha sido comprobada su eficacia en diversos artículos de carácter científico, este método aparte de ser efectivo también es económico, ya que solo se necesita de una cámara, una computadora, un patrón el cual uno mismo puede elaborar y el toolbox para Matlab que es gratis y se puede descargar en internet. Los resultados fueron buenos ya que se obtuvo un error muy bajo en la comparación de los resultados teóricos y experimentales, todo esto se demuestra a través de gráficas y tablas de comparación.

## **Bibliografía**

- [1]. Website CICATA, Querétaro. <http://www.cicataagro.ipn.mx/wps/>
- [2]. Anibal Ollero Baturone 2001, "Robótica, manipuladores y robots móviles"
- [3]. "ROBOTIS e-Manual v1.08.00" <http://support.robotis.com/en/>
- [4]. Carletti, E.J.,2007. \Servos: Caractersticas Basicas. " http:  
[//robots-argentina.com.ar/MotorServo\\_basico.html](http://robots-argentina.com.ar/MotorServo_basico.html)
- [5]. Festo 2011. "<http://www.festo.com/cms/es-mx-mx/>
- [6]. Nolfi y Floreano. 2000. 'Robots Caminantes'
- [7]. Gabriel Gonzales Flores 2011, "ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE OBJETOS POR MEDIO DE RECONSTRUCCIÓN 3-DIMENSIONAL"
- [8]. SHARP GP1S036HEZ [www.junun.org/MarkIII/.../GP1S036HEZ.pdf](http://www.junun.org/MarkIII/.../GP1S036HEZ.pdf)
- [9]. Cámara web 3D, [www.technologyreview.es/read\\_article.aspx?id=244](http://www.technologyreview.es/read_article.aspx?id=244)
- [10]. Website TheImagingSource,  
[http://www.theimagingsource.com/en\\_US/products/cameras/usb-cmos-color/dfk72auc02/](http://www.theimagingsource.com/en_US/products/cameras/usb-cmos-color/dfk72auc02/)
- [11]. "PLC: Vista Detallada" <http://rocathek.com/downloads/PLC%20Avanzado.pdf>
- [12]. "Robots Hexápodos como Plataforma de Investigación".  
[http://www.tarry.de/index\\_us.html](http://www.tarry.de/index_us.html) Agosto 2000

## **Anexo A. CM-510**

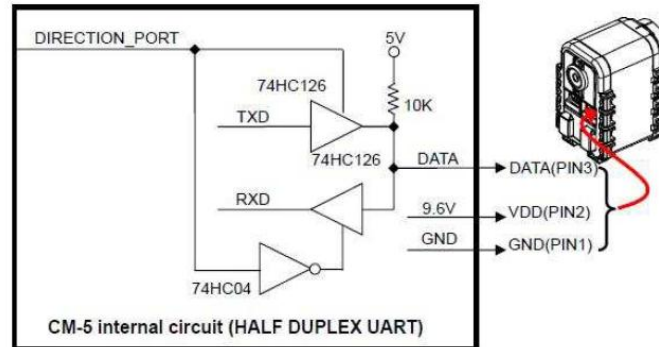
En la tabla se muestran las especificaciones técnicas de la tarjeta controladora del robot hexápodo.

**Tabla A.1. Datos técnicos CM-510.**

<b>Datos técnicos CM-510</b>	
<b>Peso</b>	<b>54 g.</b>
<b>Controlador</b>	<b>ATMega2561.</b>
<b>Rango de Voltaje</b>	<b>6V – 15 V.</b>
<b>Voltaje recomendado</b>	<b>11.1 V.</b>
<b>Consumo de corriente</b>	<b>50 mA.</b>
<b>Corriente máxima</b>	<b>10 Amperes.</b>
<b>Rango de temperatura</b>	<b>(-5 °C) -(70 °C).</b>

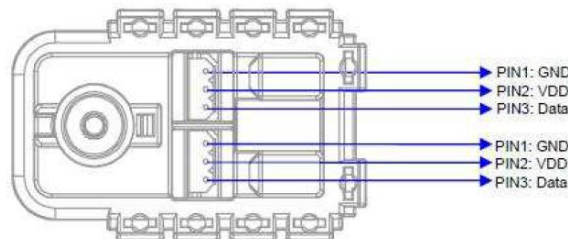
## **Anexo B. Servomotor AX-12**

El hexápodo cuenta con 18 servomotores AX-12, las especificaciones técnicas se muestran en la tabla. Las conexiones eléctricas del circuito interno se muestran en la figura B.1.



**Figura B.1. Circuito interno del controlador. [3]**

Las conexiones asignadas de las puntas (PIN) son las siguientes: los conectores en el Dynamixel están conectados punta a punta, de esta forma el SX-12+ puede ser operado con un solo conector adjunto. (Ver Figura B.2).



**Figura B.2. Asignación de puntas Servo Dynamixel. [3]**

Cada servomotor cuenta con un único número de identificación para ser controlado, el rango del número de identificación puede encontrarse de 0 a 253.

Límite de ángulo en sentido horario y anti horario (CW/ CCW)

La limitación del ángulo permite restringir los movimientos de los pasos en el robot, es decir cuando se direcciona una posición no permitida el motor se bloquee. El servo motor puede ser utilizado también como modo rueda. Cuando se encuentra en modo rueda el valor del ángulo será de 0.



### Posición deseada

La posición del servomotor se encuentra de 0 a 1023 (0X3FF), es decir 0.29 grados. Si la posición deseada se encuentra fuera del rango, el software indicara un error en el límite del ángulo. El esquema del rango de ángulos del motor se muestra en la siguiente imagen (Figura B.3).

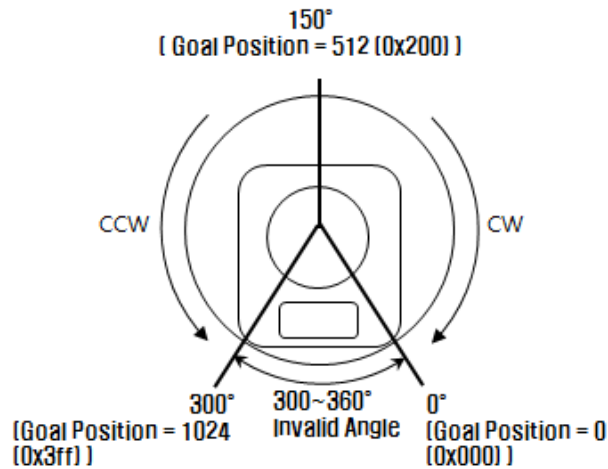


Figura B.3 Rango de ángulos Servomotor Dynamixel. [3]

**Tabla B.1. Datos técnicos AX-12.**

Datos técnicos AX-12	
Peso:	53.5 g
Dimensiones	32mm, 50mm, 40mm
Resolución	0.29°
Torque	4,5 N,m
Velocidad sin carga	59 rpm
Rango de temperatura	(-5 °C) + (70 °C)
Velocidad de comunicación	7343bps - 1 Mbps
Comunicación	USB2Dynamixel

## Anexo C. CPX-CEC-C1

Las especificaciones técnicas del PLC se muestran en la tabla C.1 y el diagrama de bloque de mando en la figura C.1.

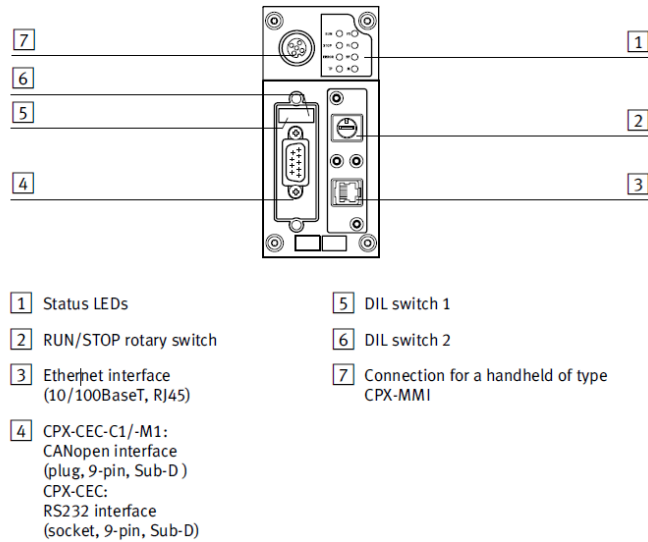


Figura C.1. Diagrama de bloque de mando CPX-CEC-C1. [5]

Tabla C.1 Datos Técnicos CPX-CEC-C1. [5]

Datos técnicos CPX -CEC-C1	
Tensión de funcionamiento [VDC].	18 a 30.
Tensión nominal de funcionamiento [VDC].	24
Indicación mediante LEDs.	<p>4 LED's específicos por CPX</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PS= Power System</li> <li>• PL=Power Load</li> <li>• SF= System Failure</li> </ul> <p>• M= Modify Parameter/ Force active</p> <p>Un LED para diagnóstico colectivo.</p>
Interface neumática.	LED para indicación del estado de la válvula.
Diagnóstico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagnóstico para entradas, salidas y válvulas según módulos.</li> <li>• Detección de baja tensión de los módulos para diversos potenciales de tensión.</li> </ul>
Consumo de corriente.	En función de la configuración del sistema.
<p>Alimentación de corriente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloque de distribución con alimentación del sistema</li> <li>• Electrónica más detectores [A]</li> <li>• Actuadores más válvulas [A]</li> <li>• Alimentación adicional para las válvulas [A]</li> </ul>	<p>16 ( 8/10 con alimentación 7/8", 5 contactos).</p> <p>16 (10 con alimentación 7/8", 4 contactos).</p>

## Anexo D. Generador de vacío

Tabla D.1. Datos técnicos generador VN-05-N-13-PQ2-VQ2. [5]

Generador VN-05-N-13-PQ2-VQ2	
Presión de funcionamiento [bar]	1...8
Presión nominal de funcionamiento [bar]	6
Fluido	Aire comprimido filtrado, con o sin lubricación.
Temperatura ambiente [C]	0... \ + \ 60
Temperatura del fluido [C]	0... \ + \ 60
Ancho del cuerpo [mm]	13
Peso [g]	16

## Anexo E. Ventosas de fuelle

Tabla E.1. Datos técnicos Ventosa VASB-55-1/4-SI. [5]

Ventosa VASB-55-1/4-SI	
Diámetro de la ventosa [mm].	55
Peso [g].	42
Conexión de vacío.	G1/4
Diámetro nominal [mm].	4
Construcción.	Fuelle redondo 4,5
Tipo de fijación.	Mediante conexión de vacío.
Fuerza de ruptura con un 70% de vacío [N].	106

## **Anexo F. Sensor de Distancia**

### **DMS (Distance Measurement Sensor)**

El sensor GP2D-02 de Sharp, (Ver Figura F.1) es un dispositivo de reflexión por infrarrojos con medidor de distancia proporcional al ángulo de recepción del haz de luz que incide en un sensor lineal integrado, teniendo como salida una señal analógica.



**Figura F.1 Sensor DMS. [3]**

El dispositivo emite luz infrarroja por medio de un LED emisor de IR, esta luz pasa a través de una lente que concentra los rayos de luz formando un único rayo lo más concentrado posible para así mejorar la directividad del sensor, la luz va recta hacia delante y cuando encuentra un obstáculo reflectante rebota y retorna con cierto ángulo de inclinación dependiendo de la distancia, la luz que retorna es concentrada por otra lente y así todos los rayos de luz inciden en un único punto del sensor de luz infrarroja que contiene en la parte receptora del dispositivo. Este sensor es un CCD lineal y dependiendo del ángulo de recepción de la luz incidirá esta en un punto u otro del sensor pudiendo de esta manera obtener un valor lineal y proporcional al ángulo de recepción del haz de luz.

Usos:

- Utilizado para detectar objetos o paredes.
- La medición no es afectada por los colores, por lo que se obtiene una lectura de la distancia más precisa.
- Usado en robots exploradores.

Conexiones eléctricas (Pines, ver Figura F.2):

1. VCC (5V)
2. GND
3. ADC



Figura F.2 Conexiones eléctricas DMS. [3]

Especificaciones:

- Peso: 4.4g
- Rango de distancia: 10-80cm
- Voltaje de alimentación recomendado: 4.5-5.5V

Voltaje de salida con respecto a la distancia

La grafica de la Figura F.3 muestra el voltaje de la salida analógica basado en la distancia que cambia de papel blanco el cual tiene un porcentaje de reflexión del 90 % y el papel gris el cual tiene un porcentaje de reflexión del 18%. Incluso si el color y el porcentaje de reflexión cambia, el valor de la salida raramente cambia.

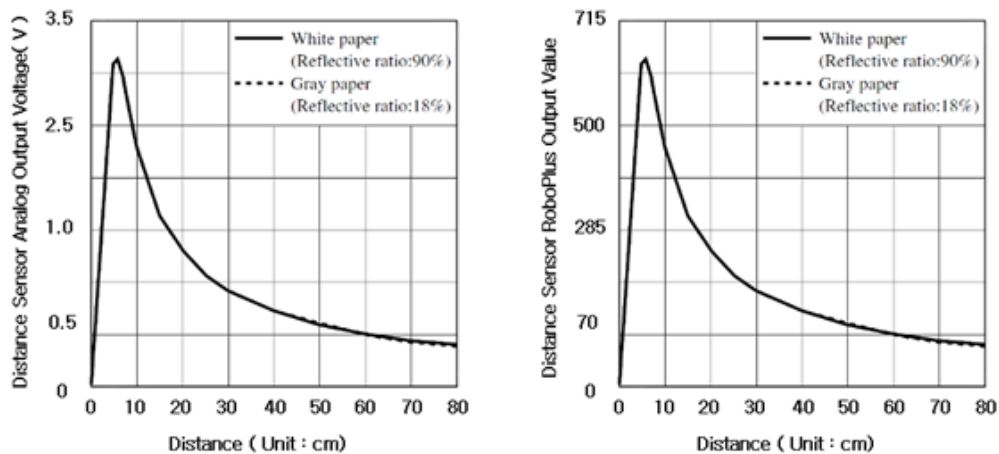


Figura F.3 Graficas de respuesta de sensor DMS. [3]

## Sensor de infrarrojo

Los sensores de infrarrojos detectan la presencia de obstáculos mediante la emisión y detección de la luz infrarroja reflejada por el objeto. (Ver Figura F.4) Debido a que la distancia se mide por la desviación del haz, su alcance se encuentra limitado a unos pocos centímetros. Además, pueden aparecer problemas de interferencias con la luz ambiental y existe influencia del color y las propiedades reflectivas de la superficie.



Figura F.4. Sensor infrarrojo. [3]

Usos:

Usa un método en el cual produce una luz infrarroja y calcula la reflexión.

No es recomendado para calcular distancias entre objetos porque aunque dos objetos se encuentren en la misma distancia, la cantidad reflejada puede variar dependiendo de la el color y el brillo de los objetos.

Conexiones eléctricas (Pines, ver Figura F.5)

- 1.- SIG1: Mantiene señal baja.
- 2.- GND
- 3.- ADC: Valor de salida detectada de IT receptor en una salida analógica.
- 4.- VCC (3.3 V).
- 5.- SIG2: Enciende el LED mandando una señal alta.



Figura F.5. Conexiones eléctricas sensor infrarrojo. [3]

Especificaciones:

- Peso: 4g
- Tamaño: 24mm-18mm-12mm

Relación entre distancia y valor de sensor.

La gráfica de la figura F.6 representa una estimación del valor del sensor cambia la distancia de objetos blancos. El valor del sensor es perceptible a cambiar dependiendo del color del objeto y su medio externo. El IR sensor es dividido en un transmisor y receptor. Puede raramente detectar objetos a más de 15 cm.

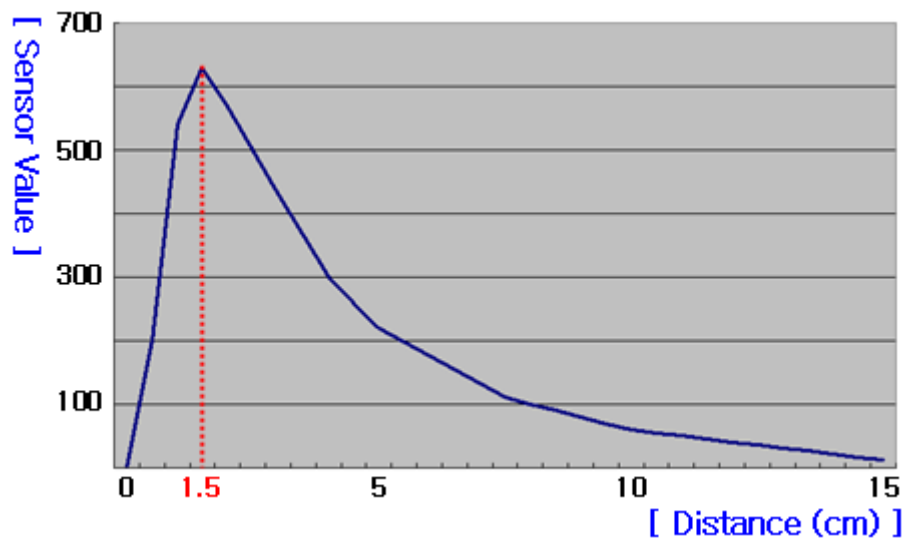


Figura F.6. Gráfica de respuesta del sensor infrarrojo. [3]

## **Anexo G. Inclinómetro**

Inclinómetro o Escoliómetro es un instrumento usado por topografía, por la aviación y por los navíos para medir la inclinación del plano con respecto de la horizontal (superficie terrestre).

En términos navales el inclinómetro permite medir el grado de escora de un buque respecto a su eje radial o el grado de inclinación longitudinal o axial. En el aspecto topográfico, los topógrafos pueden medir el ángulo de inclinación del terreno respecto del plano horizontal terrestre usando un inclinómetro de terreno, para de este modo modelar el terreno estudiado. En la industria aeronáutica, el inclinómetro permite al piloto conocer la posición de las alas respecto del falso horizonte del instrumento. Los inclinómetros también son muy usados en automovilismo, en especial en los vehículos off-road o todo terrenos.

### Principio del instrumento

Existen varios principios para construir un inclinómetro, algunos de basan en la deformación de una varilla de acero que experimenta torsión respecto de la inclinación a la que se le somete. Otros inclinómetros están basados en un balón libre que actúa por la acción de la fuerza gravitacional, y otros se basan en el desplazamiento de una burbuja de aire en un medio líquido confinado (medidor de nivel). El Inclinómetro digital es un medidor de ángulos e inclinaciones. Esta tiene la función de Inclinómetro, nivel y medidor de ángulos.

En este proyecto se puso en funcionamiento el sensor GP1S036HEZ de la compañía SHARP, a continuación se presentan sus características eléctricas.

El Inclinómetro GP1S036HEZ, es un sensor subminiatura que mide la inclinación en un solo plano en un rango de 360 grados. Cuenta con dos bits de resolución los cuales indican 4 posiciones: arriba, izquierda, derecha y abajo: es decir, 0, 90, 180 y 270. (Ver Figura G.1).

### Aplicaciones

Este sensor se ha utilizado en las cámaras digitales y cámaras de video.



Este sensor permite al robot conocer su inclinación con respecto a la gravedad. Esto es útil por si el robot se cae, lo detecte y se levante por sí solo. En su interior cuenta con un diodo emisor infrarrojo y dos foto-transistores, los cuales se activan o desactivan dependiendo de la posición de dos balines que se mueven por fuerza de gravedad, sus salidas son digitales.

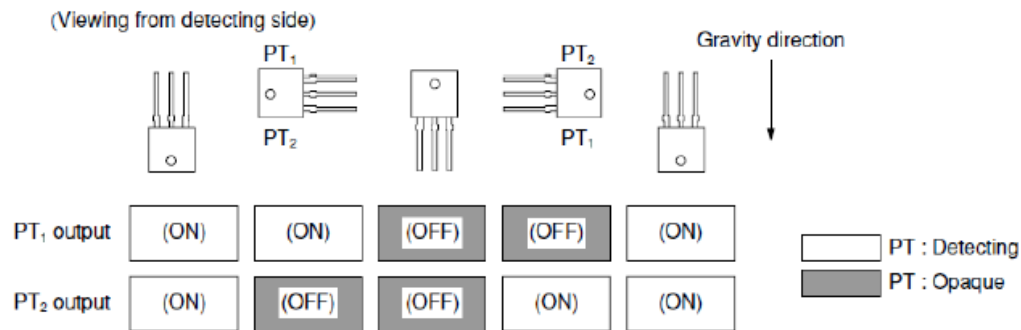


Figura G.1. Sensor GP1S036HEZ. [8]

Funcionamiento.

El sensor está formado por fotodetectores que miden la posición de una bola encerrada en una cámara. El plano en el que se mide la inclinación se define por el vector de la gravedad y por una línea trazada a través de la línea del centro del dispositivo entre las dos filas de pines del conector. En la Figura G.2 se muestra el diagrama de conexión interna del sensor.

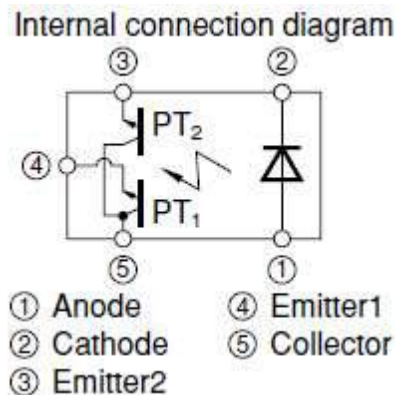


Figura G.2. Diagrama de conexión interna. [8]

El sensor dispone de 5 pines en las cuales los dos emisores son las salidas, entregando una respuesta de forma binaria, como se muestra en la tabla G.1. En las figuras G.3 y G.4 se muestran las gráficas de respuesta del sensor.

$\theta$	0°	→	30°	→	60°	→	120°	→	150°	→	210°	
I <sub>C1</sub>	OFF						*5	ON				
I <sub>C2</sub>	OFF	*5				ON			*5			

$\theta$	→	240°	→	300°	→	330°	→	360°
I <sub>C1</sub>	ON	*5				OFF		
I <sub>C2</sub>	*5	OFF						

\* Conditions : I<sub>f</sub>=5mA, V<sub>cc</sub>=5V,  $\phi = \pm 5^\circ$

\*5 Indefinite

I<sub>C1</sub> : Output current of phototransistors PT<sub>1</sub>

I<sub>C2</sub> : Output current of phototransistors PT<sub>2</sub>

$\theta$  : Device condition : Refer to the figure

$\phi$  : Device condition : Refer to the figure

ON : Output current of phototransistors : 55 $\mu$ A or more

OFF : Output current of phototransistors : 17 $\mu$ A or less

\* Output current of ON/OFF is output when device is at a standstill

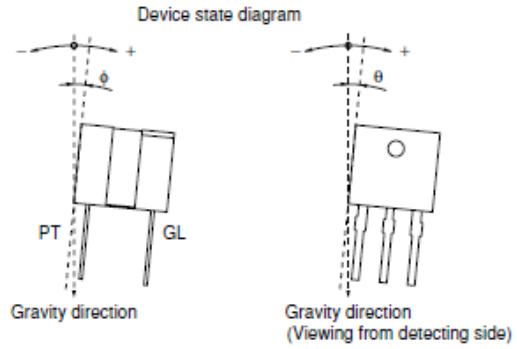


Tabla G.1. Tabla de detección de ángulos. [8]

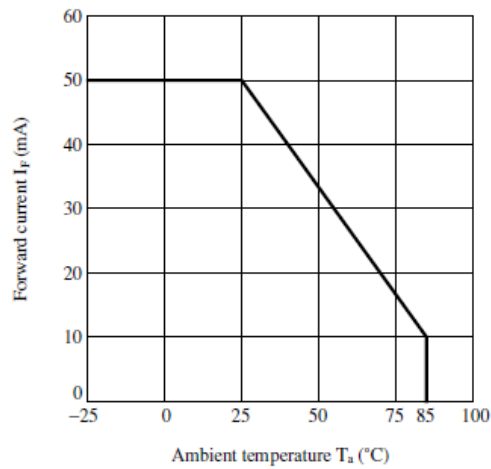


Figura G.3. Gráfica de la Corriente y Temperatura. [8]

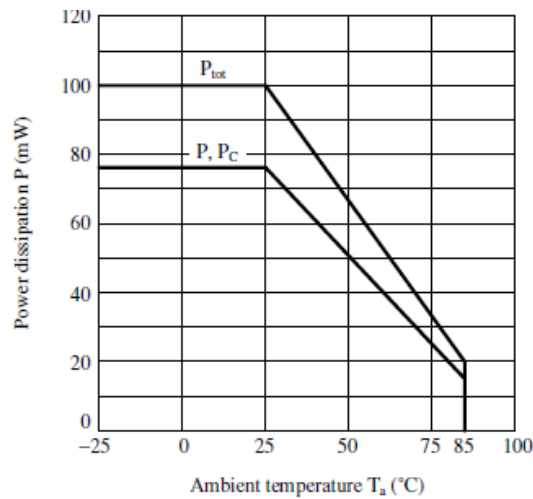


Figura G.4. Disipación de Potencia y Temperatura ambiente. [8]

## **Anexo H. Cámara estereoscópica**

Una cámara estereoscópica o cámara 3D, nombrada así debido a la visión estereoscópica humana (3D), es una cámara capaz de capturar imágenes en tres dimensiones. La visión binocular humana, produce dos imágenes que luego se mezclan en el cerebro creando la imagen 3D, estas cámaras intentan imitar este comportamiento, utilizando dos objetivos (o dos cámaras separadas estratégicamente) captando la fotografía en el mismo instante, teniendo como resultado las imágenes 3D.

La fotografía estereoscópica nace casi con la fotografía misma. Unos 10 años después de inventarse la fotografía, hacia 1850 es cuando se capturan y se dan a conocer las primeras imágenes tridimensionales. Fue muy popular durante 100 años.

Las cámaras estereoscópicas se basan en un principio muy simple, el de la visión humana. Los ojos están separados unos 65 mm el uno del otro, cada ojo ve una imagen, que aun siendo parecidas, tienen distintos ángulos, el cerebro se encarga de mezclar las dos imágenes creando el efecto de relieve. Así capturando dos imágenes con una separación como la de la visión humana, se imita el comportamiento de los ojos.

Los sistemas empleados para obtener imágenes estereoscópicas son principalmente tres:

- Cámara especial con dos objetivos.
- Dos cámaras iguales, juntas, y con la captura sincronizada.
- Una cámara, que desplazamos para obtener las dos fotografías.

Estas cámaras tienen que respetar varias normas, la primera de todas es la relación de separación de los objetivos respecto a la proximidad o lejanía del tema fotografiado, la segunda es la relación de convergencia de los objetivos sobre el motivo, si no respetamos estas normas, nuestro cerebro no podría interpretar el resultado y no entendería las imágenes.

Aplicaciones:

- Topografía y estudio del terreno

Una de las aplicaciones más antigua es la visualización y medición del relieve terrestre y el de otros planetas utilizando fotografías aéreas. Se obtienen imágenes estéreo, a partir de dos fotografías de terreno con una cierta distancia calculada entre ellas, tomadas desde aviones o satélites. Si las fotografías se realizan con la precisión adecuada, permiten calcular elevaciones de terreno. En la actualidad esta aplicación se puede realizar con una gran precisión y con visión binocular gracias a estaciones y software especialmente diseñados.

- Estudio de planetas

De forma similar a la anterior, la NASA ha obtenido numerosas vistas tridimensionales de fotografías de la tierra obtenidas desde satélites, así como de otros planetas del sistema solar. Las extraordinarias imágenes estéreo de la superficie de Marte obtenidas por la sonda Pathfinder de la NASA son otro ejemplo de aplicaciones para el estudio de otros planetas. Este método no sólo sirve para captar imágenes sino que también se utiliza para calcular distancias y tamaños de rocas y conducir con más seguridad el vehículo.

- Medicina

Es uno de los campos donde se usa más. En el campo de la microcirugía ofrece grandes posibilidades. Zeiss cuenta con sistemas de microcirugía tridimensional, del que ya existen referencias sobre sus ventajas aplicado a la oftalmología.

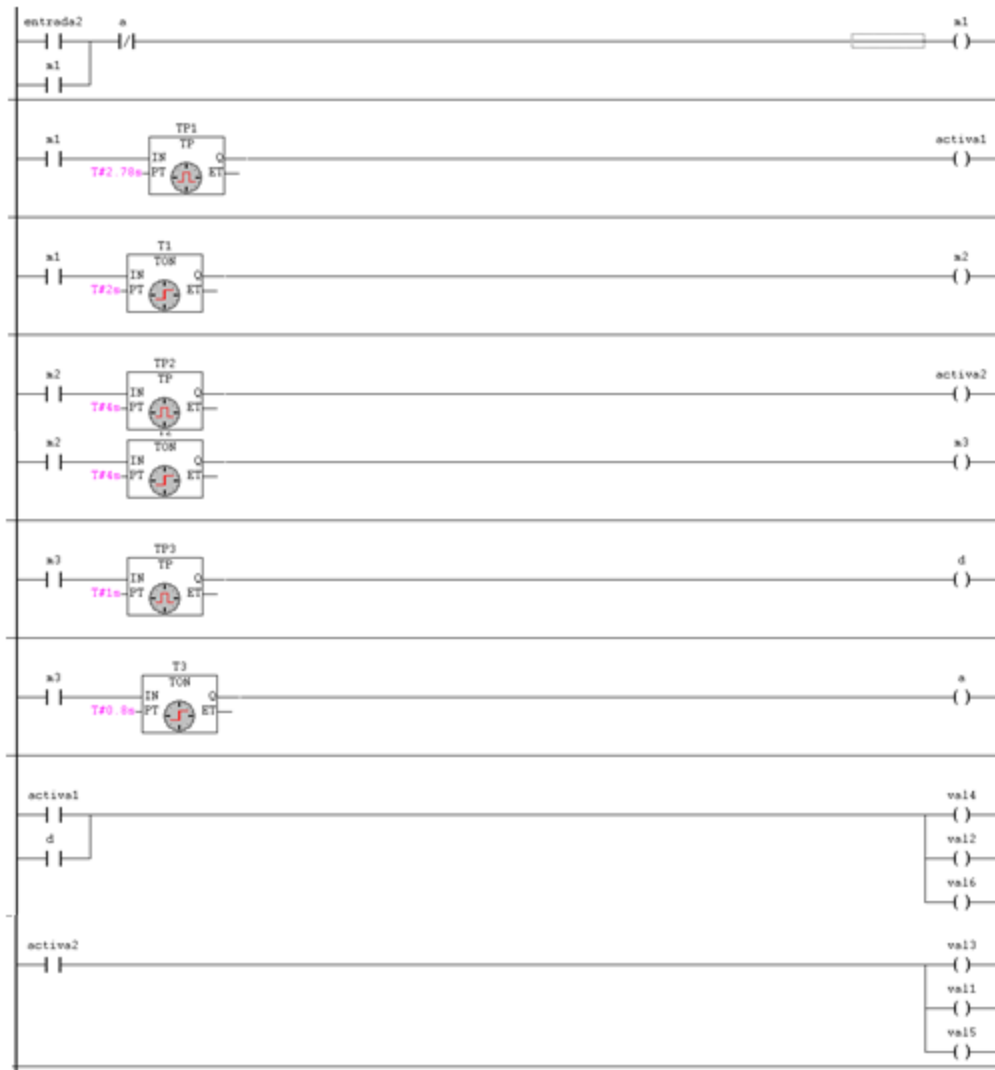
La endoscopia cuenta con una gran ayuda de la estereoscopia. También se utiliza para visualizar imágenes o modelos del interior del cuerpo humano, a partir de imágenes reales obtenidas mediante TAC (Tomografía asistida por computador) o RMN (Resonancia Magnética Nuclear). Técnicas como la radiografía estereoscópica permiten situar claramente cuerpos extraños o anomalías en el interior del paciente.

- Ingeniería Molecular

En Ingeniería molecular, sin la visualización estéreo en las estaciones de diseño sería muy complicado crear nuevas moléculas complejas.

## Anexo I. Código fuente

### Código del PLC del compilador CoDeSys



Código de Matlab, promedio de los parámetros extrínsecos de cada trayectoria.

```
clc
clear all
close all

matrizA= load ('1.2t.txt');   %%% cargar los datos de la repetición 1 de la trayectoria 2.
matrizB= load ('2.2t.txt');
matrizC= load ('3.2t.txt');
matrizD= load ('4.2t.txt');
matrizE= load ('5.2t.txt');
matrizF= load ('6.2t.txt');

matrizRe = (matrizA + matrizB + matrizC + matrizD + matrizE + matrizF)/6;
%%calcula el promedio y guardar el valor final en la variable.
save('promedio2.txt','matrizRe','-ascii'); %%% guardar la variable en un txt.
```

Código en Matlab para calcular la norma de la calibración de cámara.

```
matrizv= load ('promedio2.txt') %%% cargar los valores del promedio de la trayectoria 2.
x=0; %%% establecer variables en 0 para llenar el for.
y=0;
z=0;

for i=1:11

x1= matrizv(i,1) %%%llenar las variables con valores de x, y, z del vector de traslación
y1=matrizv(i,2) %%% del promedio de la trayectoria.
z1=matrizv(i,3)

a = [ x ; y ; z ] - [ x1 ; y1 ; z1]; %%% realizar la resta del vectori - vector-1 y guardar en la variable
norma= norm (a) %%%realizar el cálculo de la norma a partir con el comando

x= x1; %%%sustituir el valor nuevo de x1 con el valor anterior de x.
y= y1;
z= z1;
save('normaca2.txt','norma','-ascii','-append'); %%% guardar la norma para cada punto de la trayectoria
end
```

## Código en Matlab para la resolución de la cinemática directa.

```

clear all;
close all;
clc;
%%Simbólico del cosd y sen de los ángulos q1, q2 y q3
C1=sym('C1');
C2=sym('C2');
C3=sym('C3');
C4=sym('C4');
C5=sym('C5');

S1=sym('S1');
S2=sym('S2');
S3=sym('S3');
S4=sym('S4');
S5=sym('S5');

%%Simbólico de las longitudes de los eslabones, d1, d2 y d3
d1=0;
d2=sym('-d2');
d3=0;
d4=sym('-d4');
d5=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%parámetros de D-H
a1=sym('a1');
a2=0;
a3=sym('a3');
a4=0;
a5=sym('a5');
alpha1=0;
alpha2=90;
alpha3=-90;
alpha4=90;
alpha5=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Matriz de transformación homogénea del coxis al fémur
T_cf=[C1 -cosd(alpha1)*S1 sind(alpha1)*S1 a1*C1;
S1 cosd(alpha1)*C1 -sind(alpha1)*C1 a1*S1;
0 sind(alpha1) cosd(alpha1) d1 ;
0 0 0 1 ]

%%Matriz de transformación homogénea del fémur a la tibia
T_ft=[C2 -cosd(alpha2)*S2 sind(alpha2)*S2 a2*C2;
S2 cosd(alpha2)*C2 -sind(alpha2)*C2 a2*S2;
0 sind(alpha2) cosd(alpha2) d2 ;
0 0 0 1 ]

%%Matriz de transformación homogénea de la tibia a la ventosa
T_tv=[C3 -cosd(alpha3)*S3 sind(alpha3)*S3 a3*C3;
S3 cosd(alpha3)*C3 -sind(alpha3)*C3 a3*S3;
0 sind(alpha3) cosd(alpha3) d3 ;
0 0 0 1 ]

%%Matriz de transformación homogénea de la tibia a la ventosa
T_v=[C4 -cosd(alpha4)*S4 sind(alpha4)*S4 a4*C4;
S4 cosd(alpha4)*C4 -sind(alpha4)*C4 a4*S4;
0 sind(alpha4) cosd(alpha4) d4 ;
0 0 0 1 ]

%%Matriz de transformación homogénea de la tibia a la ventosa
T_c=[C5 -cosd(alpha5)*S5 sind(alpha5)*S5 a5*C5;
S5 cosd(alpha5)*C5 -sind(alpha5)*C5 a5*S5;
0 sind(alpha5) cosd(alpha5) d5 ;
0 0 0 1 ]

%%Matriz de transformación homogénea del coxis a la ventosa
t=T_cf*(T_ft*T_tv);
T=t*(T_v*T_c)
Px=T(1,4)
Py=T(2,4)
Pz=T(3,4)

```

Código en Matlab de la cinemática directa introduciendo los valores angulares de los motores.

```

clear all;
clc;
close all;
x= 0;
y=0;
z= 0;
%%% Trayectoria 1.
Q1 =-30; %%%% se establece el primer valor de Q1.
Q2=0;
Q3= -25;
Q4 = 0;
Q5=-65;
%%%Se crean las variables con los valores fijos de cada parámetro de Denavit-Hartenberg.
a1=57.61;
a2= 0;
a3= 65.54 ;
a4= 0 ;
a5= 94.7 ;

d1=0;
d2= 38.5;
d3= 0;
d4= 22.5;
d5= 0;

for i = 1: 11

Q1= Q1 +5 %%%% Q1 es el único parámetro que va a cambiar dentro del ciclo, aumenta su valor 5 veces por ciclo.

Px = cosd(Q1)*a1 + (d4 - sind(Q5)*a5)*(cosd(Q1)*cosd(Q2)*sind(Q3) - sind(Q1)*sind(Q2)*sind(Q3))
+ cosd(Q4)*cosd(Q5)*a5*(cosd(Q1)*cosd(Q2)*cosd(Q3) - cosd(Q3)*sind(Q1)*sind(Q2)) +
cosd(Q1)*cosd(Q2)*cosd(Q3)*a3 - cosd(Q5)*sind(Q4)*a5*(cosd(Q1)*sind(Q2) + cosd(Q2)*sind(Q1))
- cosd(Q3)*sind(Q1)*sind(Q2)*a3
Py = sind(Q1)*a1 + (d4 - sind(Q5)*a5)*(cosd(Q1)*sind(Q2)*sind(Q3) + cosd(Q2)*sind(Q1)*sind(Q3))
+ cosd(Q4)*cosd(Q5)*a5*(cosd(Q1)*cosd(Q3)*sind(Q2) + cosd(Q2)*cosd(Q3)*sind(Q1))
+ cosd(Q1)*cosd(Q3)*sind(Q2)*a3 + cosd(Q2)*cosd(Q3)*sind(Q1)*a3 -
cosd(Q5)*sind(Q4)*a5*(sind(Q1)*sind(Q2)
- cosd(Q1)*cosd(Q2))
Pz = sind(Q3)*a3 - d2 - cosd(Q3)*(d4 - sind(Q5)*a5) + cosd(Q4)*cosd(Q5)*sind(Q3)*a5

a = [ x ; y ; z ]- [ Px; Py ; Pz]; %%%% realizar la resta del vector, - vector1 y guardar en la variable.
aa= norm (a) %%%% calcular la norma.

x= Px;
y= Py ;
z= Pz;
xyz= [Q1',x',y',z',Px',Py',Pz']; %%%% se llena el vector con los valores de x, y, z de la cinemática directa.
save( 'cinematica1.txt','xyz', '-ascii', '-append' ); %%%% se guardan los vectores de traslacion en un txt.
save( 'normac1.txt','aa', '-ascii', '-append' ); %%%% se guardan los valores de la norma en un txt.
end

```



## Código en Matlab para graficar las trayectorias con la cinemática directa.

```
%%Se cargan los valores de la cinemática directa en la variable.
graph1= load ('cinematica1.txt');

for i=1:11 %% se establece un for para los 11 puntos.
x(i,1)= graph1(i,5); %% se cargan los valores del vector en la variable.
y(i,1)= graph1 (i,6);
z(i,1)=graph1(i,7);
end

primera= plot3 (x,y,z,'g*'); %%se grafica la trayectoria 1
xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
grid on
hold on

graph2= load ('cinematica2.txt');

for i=1:11
x(i,1)= graph2(i,6);
y(i,1)= graph2 (i,7);
z(i,1)=graph2(i,8);
end

segunda= plot3 (x,y,z,'r*') %%%se grafica la trayectoria 2
title('Trajectories')
grid on
hold on

graph3= load ('cinematica3.txt');

for i=1:11
x(i,1)= graph3(i,6);
y(i,1)= graph3 (i,7);
z(i,1)=graph3(i,8);
end

tercera= plot3 (x,y,z,'b*'); %%% se grafica la trayectoria 3
hold on

legend('Trajectory 1','Trajectory 2','Trajectory 3') %%encabezado de la gráfica
```

## Código en Matlab para la gráfica de las trayectorias de la calibración de cámara

```
%%Se cargan los valores del modelo experimental en la variable.
graph1= load ('promedio1.txt');

for i=1:11 %% se establece un for para los 11 puntos.
x(i,1)= graph1(i,1); %% se cargan los valores del vector en la variable.
y(i,1)= graph1 (i,2);
z(i,1)=graph1(i,3);
end

primera= plot3 (x,y,z,'g*'); %% se grafica la trayectoria 1
xlabel('X')
ylabel('Y')
zlabel('Z')
grid on
hold on

graph2= load ('promedio2.txt');

for i=1:11
x(i,1)= graph2(i,1);
y(i,1)= graph2 (i,2);
z(i,1)=graph2(i,3);
end

segunda= plot3 (x,y,z,'r*') %% se grafica la trayectoria 2
title('Trayectorias')
grid on
hold on

graph3= load ('promedio3.txt');

for i=1:11
x(i,1)= graph3(i,1);
y(i,1)= graph3 (i,2);
z(i,1)=graph3(i,3);
end

tercera= plot3 (x,y,z,'b*'); %% se grafica la trayectoria 3
hold on
legend('primera','segunda','tercera') %%encabezado de la gráfica
```

## Código en MikroC para la placa de instrumentación.

```
unsigned long int accord, adc_rd1, adc_rd2; // creación de variables

void main ()

{
  /// Declaración de puertos
  TRISB = 0b00000000;
  ADCON1= 0x00;
  TRISA=0xFF;

  while (1)
  {
    // lectura de puertos analógicos
    adc_rd = ADC_Read (0);
    adc_rd1 = ADC_Read (1);
    adc_rd2 = ADC_Read (2);

    if (adc_rd>=400 &&adc_rd<=490 ) // activación de puerto digital
    {
      portb.f0=1;
      Delay_ms (400);
    }

    else
    {
      portb.f0=0;
    }

    if (adc_rd1 >=400 && adc_rd1 <=490 ) // activación de puerto digital
    {
      portb.f1=1;
      Delay_ms (400);
    }

    else
    {
      portb.f1=0;
    }

    if (adc_rd2 >=400 && adc_rd2 <=490 ) // activación de puerto digital
    {
      portb.f2=1;
      Delay_ms (400);
    }

    else
    {
      portb.f2=0;
    }

  }
}
```