

Universidad del Valle de Guatemala



## **Megaproyecto Robot explorador**

Trabajo de investigación presentado por Stefanie María del Rosario Castillo González, Luis Fernando Chacón Paz, Héctor José Morales Molina y Gustavo Antonio Prera Sierra para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica.

Guatemala  
2008

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

*Megaproyecto*  
*Robot explorador*

Trabajo de investigación presentado por Stefanie María del Rosario Castillo  
González, Luis Fernando Chacón Paz, Héctor José Morales Molina y Gustavo  
Antonio Prera Sierra para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Electrónica.

Guatemala

2008



*Megaproyecto*  
*Robot explorador*

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

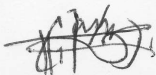
**Megaproyecto**  
**Robot explorador**

Trabajo de investigación presentado por Stefanie María del Rosario Castillo  
González, Luis Fernando Chacón Paz, Héctor José Morales Molina y Gustavo  
Antonio Prera Sierra para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Electrónica.

Guatemala

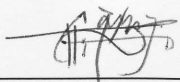
2008

Vo.Bo.:

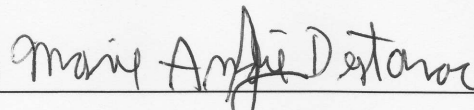
(f)   
\_\_\_\_\_

Msc. Carlos Esquit

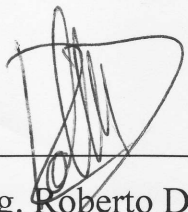
Tribunal:

(f)   
\_\_\_\_\_

Msc. Carlos Esquit

(f)   
\_\_\_\_\_

Inga. Marie Destarac

(f)   
\_\_\_\_\_

Ing. Roberto Delgado

Fecha de aprobación: 24 de noviembre de 2008.

## PREFACIO

El 4 de julio de 1997 la NASA aterrizó el primer vehículo explorador en Marte, conocido como *Sojourner*. Esta misión, Mars Pathfinder, fue la primera en aterrizar en Marte un vehículo explorador autónomo y con el objetivo de explorarlo a un menor costo. El diseño e implementación de robots exploradores tuvo gran auge desde esa fecha. En 2004 se envió otro robot explorador, llamado *Spirit*, el cual recorrió la superficie Marciana y logró contestar muchas preguntas no resueltas acerca de la historia del planeta rojo. Estos vehículos exploradores tenían un computador a bordo que controlaba todos sus movimientos. Éste empleaba un microprocesador Rad 6000 de 32 bits, operaban a una velocidad de 20 millones de instrucciones por segundo y poseía una memoria, programable en C, de 1 gigabyte.

Dada la gran distancia a Marte, no era posible controlar el robot desde la tierra por lo que era necesario que éste pudiera controlarse de forma autónoma. El control del robot fue realizado por la computadora que llevaba a bordo. Ésta procesaba la información que le era retroalimentada de sensores e imágenes. Estas imágenes eran provistas por un satélite en órbita y por cámaras colocadas sobre el robot, que simulaban vista estereoscópica.

Ésta fue la inspiración que tuvieron los estudiantes de 5to año de Electrónica en 2005 para presentar el proyecto de graduación llamado *Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico*, en la Universidad del Valle de Guatemala. El robot construido, propiedad de la Universidad, se llama *Rover* y se diseñó con las características básicas de los robots enviados a Marte por la NASA. El sistema de control del *Rover* se basaba en el procesamiento de la información provista por sensores colocados sobre el robot e imágenes provistas por una cámara que simulaba ser un satélite, colocada sobre el terreno sobre el cual se movería el robot.

El proyecto *Robot explorador* nació con el afán de darle seguimiento a este trabajo, sin embargo se decidió darle otro fin al robot. La gran cantidad de basura que se acumula en lugares públicos es un problema real en el país. Después de un feriado o fechas festivas, las playas y demás lugares públicos, terminan repletos de basura. Es por esto que se pensó cambiar el objetivo general del robot explorador y darle una aplicación que resuelve una necesidad real en el país. La nueva aplicación del robot es un *robot limpia playas*, cuyo objetivo será limpiar las playas Guatemaltecas de manera autónoma. El robot podrá ser colocado sobre una playa y este recogerá la basura que se encuentre en ella.

Las funciones básicas son las mismas, el robot es autómatas, el sistema sensores y visión retroalimenta al sistema de control para que este procese la información adquirida y en base a ella tome decisiones respecto a los movimientos robot. Adicionalmente se integran dos nuevos módulos, los paneles solares y el brazo robótico. Estos permitirán que el robot pueda funcionar sin gran consumo de energía y pueda recolectar basura. El proyecto utilizará como base la estructura del robot construida en 2005. Algunos de los cambios significativos que se le hicieron a ésta son la adición de un recipiente sobre el robot, utilizada para que éste almacene la basura recolectada, la adición del brazo robótico y del sistema de celdas solares, y la reubicación de los sensores de proximidad y de la cámara. El robot construido es un prototipo funcional a nivel de laboratorio de un *robot limpia playas*. Lo descrito anteriormente es a grandes rasgos, el proyecto de graduación *Robot explorador* presentado en 2008 por cuatro estudiantes para optar al grado académico de licenciados en Ing. Electrónica en la UVG.

# CONTENIDO

	Página
Lista de figuras .....	xi
Lista de tablas .....	xv
Resumen .....	xvii

## *Capítulos*

I. Introducción .....	1
A. Antecedentes .....	3
1. Robots limpia playas .....	3
2. Megaproyecto UVG 2005 “Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico” .....	4
a. Módulo de electromecánica .....	5
b. Módulo de inteligencia artificial .....	6
c. Módulo de electrónica .....	7
d. Módulo de telecomunicaciones .....	7
B. Planteamiento del problema .....	8
II. Objetivos .....	11

III. Marco teórico .....	13
A. Módulo de control	
1. Sensores .....	13
a. Sensores infrarrojo .....	13
b. Sensores de temperatura .....	15
c. Navegación .....	16
2. Sistema de control .....	18
3. Protocolos .....	19
a. Protocolo de comunicación I2C .....	19
B. Módulo de visión por computadora	
1. Axis 205.....	20
2. Redes WLAN .....	22
C. Módulo de brazo robótico	
1. Parámetros de diseño de un brazo robot.....	23
a. Convención Denavit-Hartenberg (DH) .....	23
b. Grados de libertad .....	25
c. Carga máxima .....	25
d. Espacio de trabajo .....	26
e. Cinemática directa .....	26
2. Sensores de presión (FSR) .....	28
D. Módulo de energías alternativa	
1. Celdas fotovoltaicas .....	29
2. Reguladores de voltaje .....	37

IV.	Delimitación del tema .....	39
V.	Diseño experimental y resultados .....	43
A.	Colocación de sensores de temperatura .....	44
1.	Diseño experimental .....	44
2.	Resultados .....	45
B.	Sensores de distancia .....	45
1.	Diseño experimental .....	45
2.	Resultados .....	47
C.	Control de movimiento .....	48
1.	Diseño experimental .....	49
D.	Sistema de control .....	50
1.	Diseño experimental .....	50
E.	Comunicación inalámbrica entre el robot y la estación central .....	51
1.	Diseño experimental .....	51
2.	Resultados .....	52
F.	Protocolo de comunicación entre la estación central y el PIC maestro .....	53
1.	Diseño experimental .....	53
2.	Resultados .....	53
G.	Algoritmo de búsqueda de basura robot .....	59
1.	Diseño experimental .....	59
2.	Resultados .....	61
H.	Celdas solares .....	64
1.	Diseño experimental .....	64
a.	Investigación de celdas solares, circuitos y regulador de voltaje .....	64
2.	Resultados .....	72
a.	Construcción de la parte mecánica .....	72

VI.	Discusión .....	75
VII.	Conclusiones y recomendaciones .....	79
VIII.	Fuentes .....	81
	A. Bibliografía .....	81
	B. Referencias de internet .....	82
IX.	Apéndice .....	85
X.	Glosario .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Personas limpiando el puerto de San José después de que acaba el verano y todos los guatemaltecos regresan a sus tareas cotidianas. ....	4
2. Rover UVG, robot implementado en UVG en 2005. ....	4
3. Forma de sensores Sharp. ....	14
4. Forma de emisión y recepción de haz IR. ....	14
5. Ángulo de recepción a diferentes distancias. ....	15
6. Sensor de temperatura LM35. ....	16
7. Imagen de brújula digital CMPS03. ....	17
8. Esquema de un sistema de control. ....	18
9. Bus I <sup>2</sup> C. ....	20
10. Cámara de red: Axis 205. ....	21
11. Brazo robot de 4 grados de libertad ....	24
12. Brazo robot utilizando la convención DH ....	24
13. Diagrama de cuerpo libre de un brazo ....	25
14. Análisis de torques ....	25
15. Espacio de trabajo ....	26
16. Diagrama para el cálculo de la posición del efector final ....	28
17. Construcción de un sensor FSR ....	29
18. Esquema de un sensor FSR ....	29
19. Resistencia en función de fuerza (g) ....	29
20. Celdas en paralelo ....	30
21. Celdas en serie ....	30
22. Ángulo de incidencia ....	31
23. Gráfica I vrs V típica ....	32
24. Efecto de temperatura en la curva I vrs V. ....	33
25. Voltaje de operación al cargar una batería ....	35

---

26. Arreglo en paralelo-serie con diodos de bypass y aislamiento .....	36
27. Conexión de un arreglo fotovoltaico .....	37
28. Circuito integrado MCP1827 .....	38
29. Diagrama de bloques de módulos involucrados en el megaproyecto “Robot explorador” .....	39
30. Colocación de sensores de temperatura .....	44
31. Colocación final de sensores de proximidad .....	46
32. Colocación de sensores de agujeros .....	46
33. Valor de salida vrs distancia GP2D12 .....	47
34. Valor de salida vs distancia GP2D120 .....	48
35. Referencia de la brújula digital .....	49
36. Lazo de control realizado .....	50
37. Red WLAN montada para transmisión de datos entre la estación central y el Rover .....	53
38. Algoritmo de control del Rover .....	61
39. Algoritmo en modo automático del brazo inteligente .....	62
40. Partes del brazo inteligente .....	63
41. Ensamblaje del brazo inteligente al robot explorador .....	63
42. Circuito de conexión de celdas solares .....	65
43. Diseño 3 del Rover, vista desde arriba .....	68
44. Diseño 3 del Rover .....	68
45. Diseño de motores servo en el Rover .....	69
46. Diseño de motores servo en movimiento en el Rover .....	69
47. Diseño de actuadores lineales en el Rover .....	70
48. Diseño de actuadores lineales estirados en el Rover .....	70
49. Diseño de actuadores lineales encogidos en el Rover .....	71
50. Funcionamiento del módulo .....	72
51. Actuadores lineales en el Rover .....	72
52. Actuator lineal estirado en el Rover .....	73
53. Actuator lineal encogido en el Rover .....	73
54. Motores servo en movimiento en el Rover .....	74

55. Circuito de controlador maestro del Robot explorador .....	85
56. Circuito de controlador de movimiento del Robot explorador .....	86
57. Circuito de conexión de sensores de temperaturas en el Robot explorador .....	87
58. Circuito controlador de sensores de temperatura del Robot explorador .....	87
59. Circuito de conexión de sensores infrarrojos en el Robot explorador .....	88
60. Circuito controlador de sensores infrarrojos del Robot explorador .....	88
61. Circuito de sistema de control del Robot explorador .....	89
62. Circuito de sistema de control del brazo del Robot explorador .....	90
63. Circuito de sistema de control de celdas solares .....	91



## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Características relevantes cámara Axis 205 .....	22
2. Temperaturas del explorador en distintos escenarios .....	45
3. Relación digital-distancia GP2D12 .....	47
4. Relación digital-distancia GP2D120 .....	48
5. Cantidad de pulsos generados por el movimiento en medio segundo .....	51
6. Código enviados por el PIC maestro del Rover hacia la estación central .....	54
7. Códigos enviados desde la estación central hacia el PIC maestro del Rover .....	55



## RESUMEN

El proyecto realizado en 2005 por los estudiantes de 5to año de ingeniería electrónica, llamado *Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico*, es el que se continúa ahora en 2008 con el megaproyecto llamado *Robot Explorador*. En 2005 se desarrolló un robot explorador de Marte construyendo un vehículo, implementando una estación remota, controlándolo a través de Internet y por un sistema de inteligencia artificial que le permite al robot tomar decisiones. Ahora en 2008, el presente Megaproyecto, *Robot Explorador*, pretende realizar mejoras a los sistemas de control y visión por computadora del robot, añadir dos nuevos módulos, energía alternativa por celdas solares y brazo robótico, y darle una nueva aplicación al robot explorador, *Rover*, la cual es *Robot limpia playas*.

Los módulos que conforman al robot en el Megaproyecto *Robot explorador*, son cuatro, *módulo de control*, *módulo de visión por computadora*, *módulo de brazo robótico* y *módulo de energía alternativa*. Los cuatro módulos en conjunto permiten que el robot pueda ejecutar la tarea de recolección de basura autónomamente.

El diseño e implementación del nuevo sistema de control del *Rover* se llevó a cabo orientado a que éste pudiera realizar la tarea de recolección de basura de forma autónoma. El robot se comunica con una computadora en la estación central. En ella se ejecuta un algoritmo que, a través del análisis de imágenes provistas por una cámara de red colocada sobre el robot, toma decisiones respecto a la trayectoria a seguir del *Rover* y le indica al brazo robótico cuando éste debe recolectar basura. El programa en la estación

central se comunica con el robot y la cámara por una red *IEEE 802.11 (wi-fi)*. El *módulo de control* se encarga de mover al robot según le indica el algoritmo de control ejecutándose en la computadora en la estación central. El *módulo de brazo robótico* recolecta basura de forma autónoma al indicárselo el algoritmo de control. El *módulo de celdas solares* se encarga de proveer y distribuir la energía a todos los módulos del robot, éste módulo recarga las baterías a través de la energía capturada por las celdas solares colocadas a un costado del robot y que buscan la mejor alineación con la luz disponible.

El robot implementado realiza la tarea de recolección de basura exitosamente.

# I. Introducción.

---

La tecnología avanza rápidamente y los sistemas electrónicos se vuelven más complejos, a la vez que presentan aplicaciones cada vez más interesantes. Los exploradores robotizados y autónomos son un ejemplo de dichas aplicaciones, mostrando actividades inteligentes y siendo un recurso importante de información para los seres humanos.

Un robot autómatas es aquel que puede realizar la tarea para el cual fue diseñado sin ayuda humana. Es así como la ingeniería electrónica y mecánica pretende relevar al humano de tareas triviales y/o repetitivas, dejando que éste se ocupe de tareas que realmente exigen y requieren toda la capacidad de su inteligencia. Estos exploradores se envían para realizar tareas de investigación, por lo que deben ser equipados con lo último en tecnología, diferentes tipos de sensores, mecanismos de mando y control sobre el vehículo, equipo de telecomunicaciones, y niveles apropiados de inteligencia artificial.

La robótica inteligente autónoma es un enorme campo de estudio multidisciplinario, que se apoya esencialmente en la ingeniería (mecánica, eléctrica, electrónica e informática) y en sistemas más complejos, se ayuda también de las ciencias (física, anatomía, psicología, biología, zoología, etología, etc.). La robótica inteligente autónoma se refiere a sistemas automáticos de alta complejidad que presentan una estructura mecánica articulada –gobernada por un sistema de control electrónico– y características de autonomía, fiabilidad, versatilidad y movilidad.

En esencia, los “robots inteligentes autónomos” son sistemas dinámicos que consisten en un controlador electrónico acoplado a un cuerpo mecánico. Así, estas máquinas necesitan de adecuados sistemas sensoriales (para percibir el entorno en donde se desenvuelven), de una precisa estructura mecánica adaptable (a fin de disponer de una cierta destreza física de locomoción y manipulación), de complejos sistemas efectores

(para ejecutar las tareas asignadas) y de sofisticados sistemas de control (para llevar a cabo acciones correctivas cuando sea necesario).

La institución que desarrolla con la más alta tecnología *robots autómatas exploradores* en América, es la NASA, institución gubernamental de E.E.U.U. responsable de los programas espaciales de dicho país. La NASA implementa, en conjunto con universidades estadounidenses, de gran prestigio, robots exploradores autómatas llamados *Rover*, los cuales son enviados a explorar planetas vecinos. Estos robots son parte de la clase Discovery de la NASA, que pretende fomentar nuevos métodos de exploración de planetas vecinos. El sistema de control diseñado para estos robots les permite, sin ayuda humana, entrar a la atmósfera del planeta destino, descender a través de ella, aterrizar exitosamente en el planeta, explorarlo y enviar información de interés a los científicos en la tierra, utilizando transmisión satelital. No cabe duda que esta institución implementa robots exploradores con la más alta tecnología existente. [25]

En 2005 los estudiantes de quinto año de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle, notaron la importancia de fomentar el desarrollo de tecnologías en el país y optaron por presentar como trabajo de graduación, el diseño e implementación de un robot explorador que imita a los robots *Rover* que envía la NASA a explorar planetas vecinos. El proyecto fue seguido de cerca por el diseñador de los exploradores de la NASA e hizo notar su sorpresa y aprobación al observar el excelente trabajo realizado por los compañeros graduados en 2005. [2,5]

Este proyecto retoma el trabajo realizado en 2005, con el fin de adentrarse más en el campo de los sistemas robotizados autárquicos. El Megaproyecto con el nombre de *Robot explorador* propone *el diseño e implementación del sistema de control del robot autómata Rover*, propiedad de la Universidad del Valle de Guatemala, para la exploración de playas y recolección de basura en ellas. Éste es un proyecto retador que involucra, principalmente la *ingeniería de inteligencia artificial* y la *ingeniería de control*, con el fin de implementar un sistema de control para el robot autómata. Ésta no

es una tarea fácil, y se requiere de conocimientos de la electrónica, mecánica, procesamiento digital de señales, microcontroladores y teoría de control.

### A. *Antecedentes*

A continuación se presenta la información existente previo al desarrollo del presente trabajo de graduación, acerca de los temas involucrados:

1. *Robots limpia playas.* Alrededor del mundo existen muchas comunidades que se han asentado aledañas al mar debido a la creciente densidad de población. Adicionalmente, muchos vacacionistas visitan las playas más concurridas, lo cual ha causado que la contaminación de las mismas sea un problema real en la mayoría de países del mundo. Lamentablemente los métodos para limpiar playas no son suficientes y requieren del esfuerzo de muchas personas, ya que generalmente las zonas son de difícil acceso y la tarea es exhaustiva [7].

Es por ello que se propone la búsqueda de soluciones a este problema mediante el uso robots autómatas dedicados a la limpieza. Este tipo de robots pertenecen a la robótica de servicio, que tiene como objetivo el diseño y construcción de robots con aplicaciones prácticas y de utilidad directa para la sociedad como, entre otras, la limpieza, exploración y vigilancia.

La idea general de un robot limpia playas es un robot autómatas, con sensores y mecanismos de control pre-programados, que lleva a cabo la tarea de limpieza de playas. Este debe reconocer y recoger basura de tamaño y peso limitados al tipo de brazo que tenga.

**Figura 1 - Personas limpiando el Puerto de San José después de que acaba el verano y todos los guatemaltecos regresan a sus tareas cotidianas [7]**



2. *Megaproyecto 2005 UVG “Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico”*. El Megaproyecto desarrollado en 2005 por los estudiantes de 5to año de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle de Guatemala tuvo como objetivo el desarrollo e implementación del proyecto de graduación denominado *Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico*. Esta iniciativa dio inicio al proyecto del departamento de Ing. Electrónica de la UVG, denominado *Rover*.

**Figura 2 – Rover UVG, robot implementado en UVG en 2005 [2]**



Este proyecto tenía como objetivo crear un robot que cumpliera, en su mayoría, con las especificaciones del robot que la NASA envió en la misión *Mars Pathfinder: Sojourner* lanzada en 1997, con el fin de explorar Marte de una forma más económica que las anteriores misiones que aterrizaron en dicho planeta. Esta misión fue exitosa, ya que aterrizó en Marte un vehículo robot con ruedas (vehículos llamados *Rover*) y éste exploró la superficie marciana, enviando información a la tierra, durante los 30 días que duró su misión. El vehículo contaba con instrumentos que permitieron el análisis del terreno y con dos cámaras llamadas *ojo izquierdo* y *ojo derecho* para poder realizar una exploración estereoscópica del terreno. Adicionalmente un satélite observaba al vehículo y enviaba las imágenes obtenidas al robot. [2]

Los módulos en los que se dividió el megaproyecto fueron:

a. *Módulo de electromecánica.* El módulo de electromecánica se encargó de realizar una investigación bibliográfica de las tendencias contemporáneas en el diseño y desarrollo de robots para poder construir el vehículo explorador. Además, estuvo a cargo de desarrollar la electrónica de potencia necesaria para mover los motores del robot. También desarrolló el sistema de diagnóstico, para poder tener controlados diversos factores del vehículo, como la temperatura de los motores, la carga de las baterías usadas, y las revoluciones por minuto de las ruedas.

En este módulo se decidió implementar una dirección semejante a la utilizada por los tanques. La implementación de una dirección de este tipo conlleva el desarrollo de sistemas de control electrónico para que los giros se realicen de manera precisa. La implementación del tipo de locomoción seleccionado requirió el diseño y fabricación de elementos especiales indispensables para su funcionamiento, como lo fueron la plataforma del robot, los ejes para las ruedas y los sprockets para distribuir el movimiento de los motores a todas las ruedas del vehículo.

Para el sistema de diagnóstico del módulo de mecánica se acoplaron algunos sensores encargados de recolectar la información, para luego ser procesada por un

controlador, y distribuir los datos obtenidos al árbitro del vehículo y el control del vehículo.

Para lograr que el robot se pudiera desplazar se implementó un circuito por medio del cual se pudiera abastecer la potencia requerida y, a la vez, otro circuito con el que se pudiera controlar la velocidad con la que se quisiera mover el vehículo.

Además de estos dos circuitos se implementaron otros dos: un circuito combinacional y un circuito aislador. El circuito combinacional sirvió para obtener sólo tres combinaciones que son las que sirven para excitar el puente H. Este circuito asegura que nunca se genere una combinación que quemaría el puente H. El circuito aislador sirve para separar la parte digital de la parte del puente H.

b. *Módulo de inteligencia artificial.* El módulo de inteligencia artificial fue el encargado de programar al robot explorador para que pueda realizar la tarea de desplazarse de un lugar a otro, y de dotarlo de la inteligencia para que pueda evitar obstáculos que se le presenten en el camino, o que pida ayuda cuando no logre solventar algún problema. Todos los movimientos y acciones que pueda tomar, como envío de datos, cálculos, interpretación de señales recibidas del módulo de electrónica, toma de fotos satelitales, creación del mapa del terreno a explorar, y el algoritmo de búsqueda del camino óptimo, están programadas, de una manera robusta, por el grupo de Programación e Inteligencia Artificial.

El arbitraje lógico actuaba como un puente entre las otras partes del módulo. Una de ellas se encarga del procesamiento de imágenes, y tiene como fin principal la generación de un mapa aproximado del terreno que el explorador debe recorrer. Esta información es muy importante para el explorador, ya que es el punto de partida del algoritmo que se desarrolla en otra de las partes del módulo. Además, el árbitro lógico está en contacto con la estación terrestre y con el árbitro del vehículo explorador, que tiene contacto con los sensores y la parte mecánica.

c. *Módulo de electrónica.* El módulo de electrónica fue el encargado del control de motores, del sistema de sensores, y de un sistema de control de flujo de información. El control de los motores es un parámetro importante porque le proporcionará al vehículo el movimiento preciso necesario para seguir el curso deseado o definido, la ubicación exacta de los obstáculos y el monitoreo del entorno los proporciona el sistema de sensores, y finalmente el control de flujo de información o árbitro es el encargado de hacer la interconexión entre los distintos sistemas montados en el vehículo, además de controlar la información entre la estación y el explorador.

Para la obtención de factores como obstáculos alrededor del explorador, fue necesario el módulo de electrónica sensorial. Este módulo se basaba en diferentes sensores.

Controlar el flujo de la información era una parte primordial, porque por medio del sistema de control de información se lograba que los datos obtenidos de los sensores se procesaran y llegara en la forma requerida al módulo de inteligencia artificial, para que se pudiera tomar decisiones. El transporte de información es bidireccional con el fin de que el sistema recibiera, procesara y enviara instrucciones.

d. *Módulo de telecomunicaciones.* El módulo de telecomunicaciones fue el responsable de establecer la comunicación inalámbrica entre el vehículo y la estación de control, de desarrollar el control vía Internet y el manejo del video, y de establecer los protocolos a utilizar por todos los módulos. Este módulo fue esencial para mantener un flujo de información adecuado entre los sub módulos y estaciones.

Fue necesario tener un canal de comunicación disponible entre la estación de Marte y el vehículo, por medio del cual el vehículo reciba las instrucciones enviadas por el árbitro de la estación de Marte y envíe la información del entorno a dicha estación. Se utilizaron módulos inalámbricos, los cuáles funcionan con microcontroladores de radiofrecuencia, para comunicar a los árbitros de la estación de Marte y vehículo, pero un

incidente causó que se quemaran los dispositivos de radiofrecuencia, por lo que se cambió el canal a uno sólido (cobre).

La comunicación entre una “Estación de Tierra” y la “Estación de Marte” se hizo por medio del control vía Internet. Se creó la interfaz por Internet para simular las dificultades del retardo en el envío y recepción de información entre el centro de comando y el vehículo.

También tenía implementado en el canal un control de flujo, de secuencia y de detección de errores, debido a que el canal era propenso a ruido. El protocolo de comunicación fue orientado a conexión, para lograr la transmisión sobre el canal libre de errores.

## *B. Planteamiento del problema*

La nueva propuesta de Megaproyecto, retoma el proyecto 2005 y pretende optimizar la circuitería, mejorar el sistema de control y visión por computadora, agregar dos módulos más, módulo de energía solar y módulo brazo inteligente, y además propone una nueva aplicación para el mismo, *robot limpia playas*.

La nueva aplicación del *Rover* enfrenta un problema real: la contaminación de playas en el país. La presente propuesta propone el diseño y construcción de autómatas que limpien playas. El robot desarrollado es un prototipo de lo que sería un *robot limpia playas*, ya que no está del todo preparado para enfrentar las condiciones de humedad y polvo que se encuentran en este tipo de ambiente. Sin embargo, la propuesta implementada es un prototipo eficiente y funcional a nivel de laboratorio de un robot de éste tipo. Además, aporta una aplicación realista para un robot explorador en países subdesarrollados, los cuales no están en la capacidad de enviar robots a explorar planetas, a corto o mediano plazo.

El *módulo de visión por computadora* ejecutará un algoritmo en la estación central que indica al robot las instrucciones a ejecutar, a través del procesamiento y análisis de imágenes. Dicho módulo implementará una red de comunicación entre la estación central, un PIC de telecomunicaciones en el robot y una cámara de red. El *módulo de control* moverá al robot según se lo indiquen las instrucciones que le sean transmitidas por el algoritmo de la estación central. El *módulo de brazo robótico* recolectará basura de forma autónoma cuando se le indique y la depositará en un basurero que el robot llevará consigo. El *módulo de celdas solares* proveerá y distribuirá la energía a todos los demás módulos además recargará las baterías mediante la energía obtenida por celdas solares. Éstas deberán orientarse y colocarse al mejor ángulo de incidencia de la luz para poder captar la mayor cantidad de energía.

Como estudiantes del último año de ingeniería electrónica de la Universidad del Valle de Guatemala deseamos aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de cinco años de carrera para plantear una solución concreta al problema de recolección de basura en playas del país, a través del diseño e implementación del sistema de control del robot autónoma *Rover*.



## II. Objetivos.

---

1. Desarrollar un proyecto multidisciplinario en el que se puedan aplicar la mayoría de los conocimientos y habilidades adquiridas durante la carrera.
2. Desarrollar un proyecto de robótica que incentive el desarrollo de nuevas tecnologías en el país.
3. Optimizar y mejorar el Megaproyecto, *Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico*, iniciado en UVG<sup>1</sup> en 2005.
4. Crear un sistema robotizado, autárquico y auto sostenible que mediante la realización de tareas, mejore la calidad de vida humana.
5. Promover la creación de autómatas que releven al humano de tareas, creando un sistema de inteligencia artificial a través del procesamiento de imágenes.
6. Construir un brazo robótico que permita al robot hacer tareas simples que puedan mejorar el tipo de actividades realizadas por el mismo.
7. Promover la preservación de recursos en el planeta, al utilizar energía renovable para proveer de energía eléctrica al robot.

---

<sup>1</sup> Universidad del Valle de Guatemala



### III. Marco teórico

---

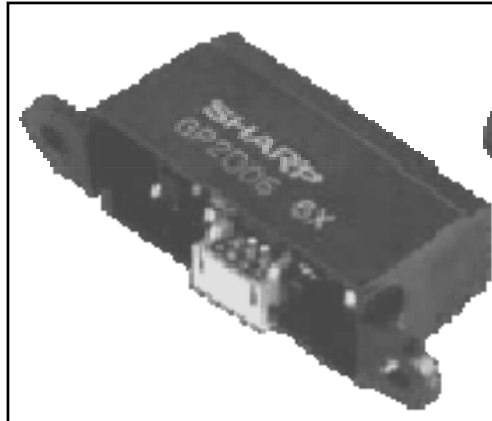
El desarrollo de un sistema robotizado es un campo que cubre una gran cantidad de conocimientos ligados de manera directa o indirecta al área de la electrónica. En el presente capítulo se describirá todo el material investigado y estudiado, que fue de utilidad en el desarrollo del Megaproyecto *Robot explorador*.

#### A. Módulo de control

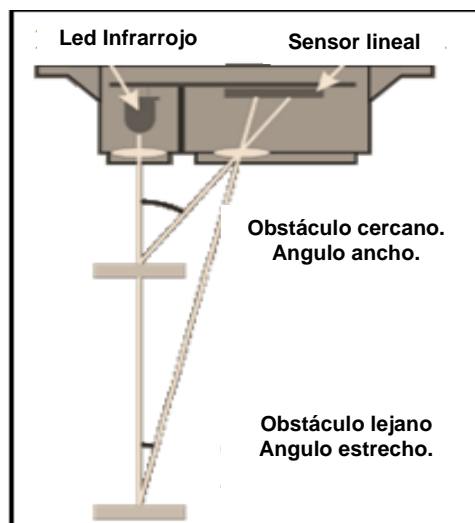
##### 1. Sensores.

a. *Sensores infrarrojo*. El infrarrojo es un tipo de luz que los humanos no pueden ver. La luz infrarroja se encuentra entre la luz visible y el espectro de microonda. Las longitudes de onda visible más largas son rojas, de ahí el nombre de infrarrojo “más allá de lo rojo”. La luz infrarroja brinda información especial que no se puede obtener de la luz visible, como el calor de un objeto. [19]

Uno de los sensores más comerciales son los Sharp. Específicamente los GP2DXX. Este tipo de sensor es un dispositivo de reflexión por infrarrojos. El sensor determina la distancia, midiendo el ángulo de recepción del haz de luz reflejado. Dependiendo del modelo utilizado, la salida puede ser analógica, digital o booleana. Estos sensores funcionan por medio de triangulación. [8]

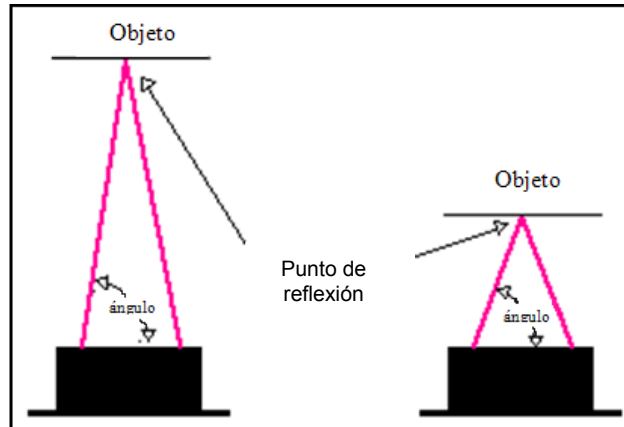
**Figura 3. Forma de sensores Sharp. [22]**

El funcionamiento de los sensores SHARP GP2D radica en que el dispositivo emite luz infrarroja por medio de un LED emisor de IR. Esta luz pasa a través de una lente que concentra los haces de luz formando un único haz lo más concentrado posible para así mejorar la directividad del sensor. La luz va directo hacia adelante y cuando encuentra un obstáculo reflectante rebota y retorna con cierto ángulo de inclinación dependiendo de la distancia. Un segundo lente concentra en un solo haz la luz que retorna. Este haz incide en un sensor lineal, del cual se obtiene la medición de distancia que es proporcional al punto de incidencia. [22]

**Figura 4. Forma de emisión y recepción de haz IR. [22]**

De esta forma, si el ángulo entre el haz emisor y el receptor es más pequeño, indica que el obstáculo se encuentra más cercano.

**Figura 5. Ángulo de recepción a diferentes distancias. [22]**



Dependiendo del modelo elegido se puede tener diferentes salidas:

- Analógicos
- Booleanos
- Digitales

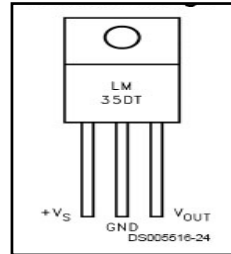
*b. Sensores de temperatura.* La lectura de temperaturas en un robot, tanto en su interior como en el exterior, puede ser algo extremadamente importante para proteger los circuitos, motores y estructura de la posibilidad de que, por fricción, esfuerzo, trabas o excesos mecánicos de cualquier tipo, se alcancen niveles peligrosos de calentamiento. [23]

El sensor LM35 es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1°C y un rango que abarca desde -55°C a +150°C. [22]

El sensor se presenta en diferentes encapsulados, pero el más común es el TO-200 cuya forma es igual a la de un transistor típico de 3 pines, dos de ellas para alimentarlo y la

tercera para entregar un valor de voltaje proporcional a la temperatura medida por el dispositivo. [22]

**Figura 6. Sensor de temperatura LM35. [6]**



Entre sus usos se destaca el detectar y guardar temperaturas en el transcurso de un trayecto de exploración. [22]

Otras características generales del LM35 son:

- Calibrado en grados centígrados (°C)
- Apto para aplicaciones remotas
- Bajo costo
- Baja auto-calefacción. [17]

*c. Navegación.* En principio, si el robot debe moverse en ambientes externos a un laboratorio, es importante que el robot posea un sistema de orientación basado en una brújula u otro dispositivo que lo ayude a la orientación. [23]

En robótica algunas situaciones de medición del entorno pueden requerir del uso de elementos de detección sensibles a los campos magnéticos. [23]

Con lo que respecta a la implementación de un sistema de navegación y posicionamiento, se desea que el explorador determine su ubicación actual para poder comparar si se ha movilizado lo que se le indicó.

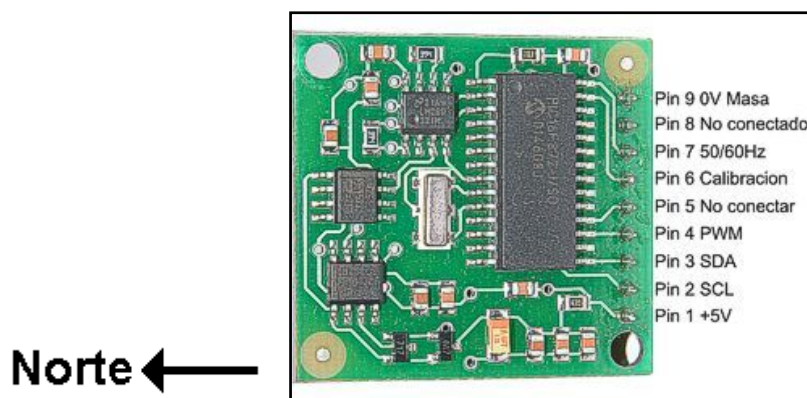
La brújula es un instrumento que sirve de orientación, tiene su fundamento en las propiedades de las agujas magnéticas. Dicha aguja magnetizada tiene libertad de girar alrededor de un eje, y por medio de la propiedad que posee dicha aguja magnetizada señala el Norte magnético de la tierra. Utiliza como medio de funcionamiento el magnetismo de la tierra. La aguja imantada indica la dirección del campo magnético terrestre, apuntando hacia los polos norte y sur. [20]

Las brújulas digitales son las que no se basan en agujas magnetizadas, sino en circuitos integrados capaces de calcular el campo magnético terrestre y enviar la información hacia otro dispositivo de manera digital.

La brújula digital CMPS03 es un sensor de campos magnéticos que una vez calibrado ofrece una precisión de 3-4 grados y una resolución de decimas. Tiene dos interfaces, mediante pulsos temporizados (modulación en anchura), o bien por medio de un bus I<sup>2</sup>C, lo que facilita su comunicación con una amplia gama de microcontroladores. [27]

Este sensor magnético está específicamente diseñado como sistema de navegación para robots.

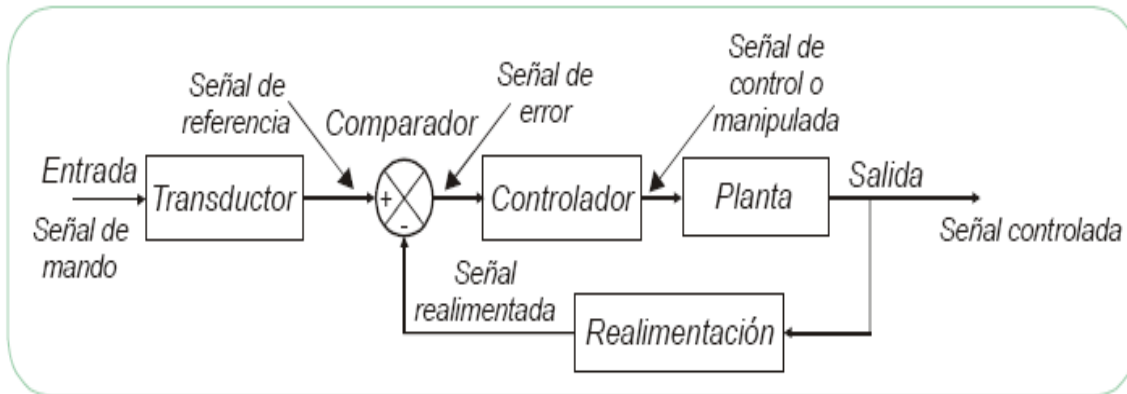
**Figura 7. Imagen de brújula digital CMPS03. [27]**



En la forma más básica y familiar, un tacómetro se explica como aquel instrumento que mide la velocidad de rotación de cualquier dispositivo mecánico. [9]

2. *Sistemas de control.* Un sistema de control es el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control.

**Figura 8. Esquema de un sistema de control.** [29]



Los sistemas de control, según la Teoría Cibernética, se aplican en esencia para los organismos vivos, las máquinas y las organizaciones. Estos sistemas fueron relacionados por primera vez en 1948 por Norbert Wiener en su obra *Cibernética y Sociedad* con aplicación en la teoría de los mecanismos de control. [29]

Se han desarrollado para manejar máquinas o procesos, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallo y se obtengan los resultados buscados. Básicamente existen sistemas de control abierto y cerrado. [29]

Los elementos básicos de cualquier sistema de control son cuatro:

- El elemento medidor, proporciona un medio de detección/medida de las condiciones requeridas.
- El elemento controlador, es el sitio donde se toman todas las decisiones sobre las acciones a tomar. Debe tomar decisiones basadas en ciertas pautas o valores requeridos.
- Los valores establecidos, son valores introducidos en el sistema por el hombre.

- El elemento corrector, es el lugar donde se realiza la corrección del proceso. Se deben ejecutar ciertas acciones físicas para llevar el proceso de nuevo a los valores establecidos. [23]

3. *Protocolos.* Los protocolos son reglas o normas que permiten la comunicación y el flujo de información entre dos dispositivos que manejan distintos lenguajes, por lo que los protocolos de comunicación son todas las convenciones y reglas que establecen como deben comunicarse los dispositivos, permitiendo el flujo de información entre ellos y la correcta interpretación de la información recibida o enviada, unificando así el lenguaje en el que se están comunicando. [16,13]

Cualquier sistema de comunicación empleado en el mundo define el protocolo de comunicación como un estándar para que todos los sistemas electrónicos se entiendan entre sí. [16]

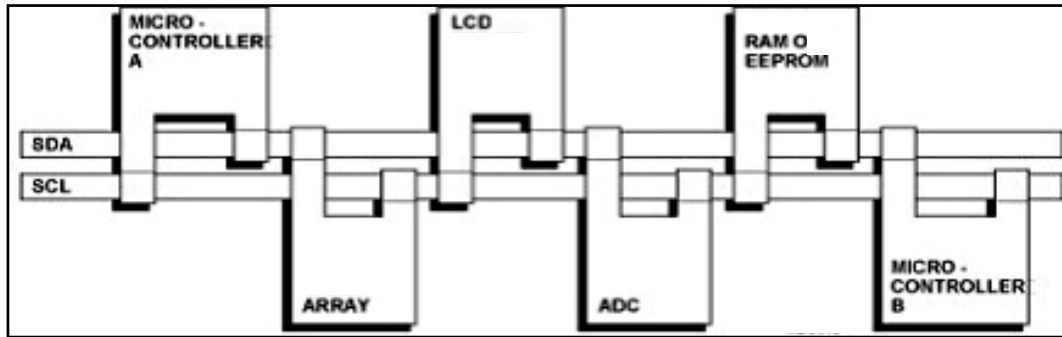
El protocolo es el encargado de garantizar un flujo de información eficiente, orientada y libre de errores, para lo cual existen varias orientaciones en los protocolos de comunicación y varios estándares de aplicación. [13]

En sí, un protocolo es software que reside en la memoria del dispositivo de transmisión. Cuando los datos están listos para transmitirse, este software es ejecutado. El software prepara los datos para la transmisión y configura la transmisión en movimiento. En la parte receptora, el software toma los datos y los prepara para el dispositivo receptor, desechando la información agregada tomando sólo la información útil. [16]

a. *Protocolo de comunicación I2C.* Es un bus de comunicaciones serie. Su nombre viene de Inter-Integrated Circuit (Circuitos Inter-Integrados). La versión 1.0 data del año 1992 y la versión 2.1 del año 2000; su diseñador fue Philips. La velocidad es de 100Kbits por segundo en el modo estándar, aunque también permite velocidades de 3.4Mbits/s. Es un bus muy usado en la industria. [15]

Para simplificar la interconexión de dispositivos a un microprocesador, se desarrolló un sencillo bus bidireccional en dos hilos por el que se transmiten los datos vía serie. [14]

**Figura 9. Bus I<sup>2</sup>C. [14]**



Las líneas SDA (datos) y SCL (reloj) son bidireccionales y están polarizadas a positivo mediante resistencia de “pull-up”, de forma que en reposo están a nivel alto. En el bus existen maestros que controlan la señal y esclavos que responden a peticiones del maestro. [14]

Habiendo varios dispositivos conectados sobre el bus, es lógico que para establecer una comunicación a través de él se deba respetar un protocolo. Existen dispositivos maestros y dispositivos esclavos y sólo los dispositivos maestros pueden iniciar una comunicación. [15]

### *B. Módulo de visión por computadora*

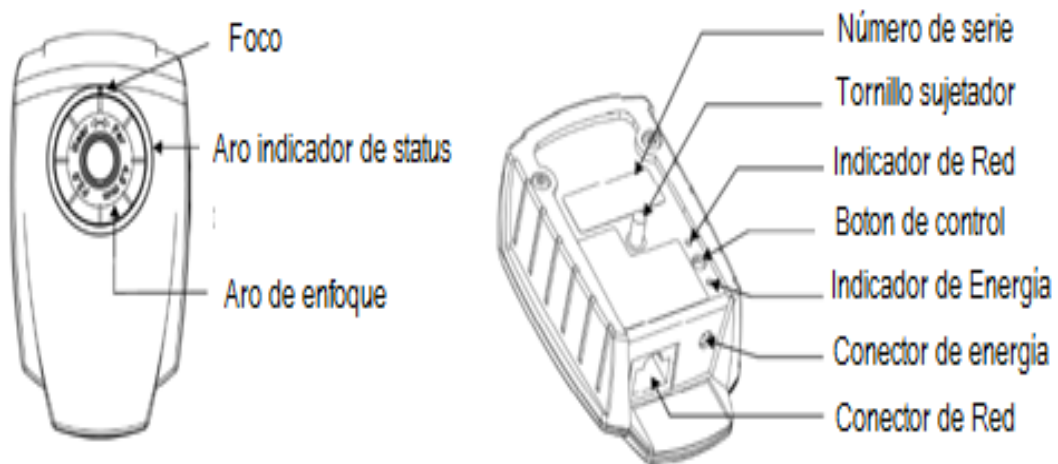
La información que se presenta a continuación fue de utilidad para el módulo de visión por computadora en la implementación del algoritmo de control del *Rover*.

1. *Axis 205.* La cámara de Red Axis 205, es una cámara de red que distribuye la compañía AXIS. Este modelo en particular es un modelo discontinuado. Esta cámara está diseñada para conectarse a una red Ethernet y requiere que se le asigne una dirección

IP, ya sea automáticamente a través del protocolo DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) que generalmente tiene los enrutadores o manualmente. [10]

Es una cámara pequeña diseñada para oficinas y casas. Este modelo de cámara transmite video en tiempo real y permite que éste sea visto desde cualquier Web-browser. Ésta es la cámara que utilizó el módulo de *control a través de internet* en 2005 para que el usuario tuviese una vista desde la perspectiva del *Rover*. [10]

**Figura 10. - Cámara de Red: Axis 205 [11]**



Las características más relevantes de la cámara se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Características relevantes cámara Axis 205 [10]**

Sensor de imagen	CMOS de barrido progresivo
Ancho focal	4.0 mm
Compresión de video	JPEG
Resoluciones	640x480, 320x240, 160x120
Frecuencia de imagen	Hasta 30 imágenes por segundo
Velocidad de obturación	1/2 - 1/10.000 segundos
Seguridad	Multiusuario con contraseña
Procesadores y memoria	CPU: RISC de 32 bits, RAM: 16 MB, Flash: 4 MB
Alimentación	5,0 – 5,5 V CC ; Mín. 400 mA
Condiciones de funcionamiento	5 - 40 °C (41 - 104 °F) / Humedad relativa: 20 - 80 %
Protocolos compatibles	IP, HTTP, TCP, ICMP, UDP, SMTP, FTP, DHCP, UPnP™, Bonjour, ARP, DNS, DynDNS, NTP
Dimensiones	85 x 55 x 34 mm (3,35" x 2,17" x 1,34")
Peso	177 g (6,24 oz), soporte incluido, sin unidad de alimentación

2. *Redes WLAN.* Las redes de comunicación de datos digitales inalámbricas, llamadas WLAN (Wireless Local Area Network) utilizan radiofrecuencia para la transmisión de datos. Permite reemplazar por conexiones inalámbricas los cables que conectan los equipos a la red, dotando a estos de movilidad. Se rige bajo el estándar IEEE 802.11 de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineer) y se caracteriza por trabajar en bandas de frecuencia exentas de licencia de operación. Es la versión inalámbrica de redes LAN. [21]

El TCP/IP es un protocolo de comunicación y se usa en transmisiones por redes LAN y WLAN. Básicamente son reglas que deben seguir los equipos conectados a una red para

intercambiar eficientemente información a través de la misma. Éste es el protocolo de capa de transporte y de red utilizado en internet. Cada servicio que se utiliza en internet se comunica utilizando uno o más puertos. Por ejemplo, el correo electrónico utiliza el puerto 25 para enviar y el puerto 110 para recibir. El puerto 80 es el que se usa para desplegar páginas web en general y es el que utilizan las cámaras de red para comunicarse. [18]

Existen dos tipos de direcciones IP, las globales y las privadas. Un dispositivo con dirección IP local no puede acceder a otro dispositivo en su red por sí solo, necesita una puerta de salida, conocida como *router* o *gateway*, para poder hacerlo. [21]

Una dirección IP es un identificador numérico de 4 bytes para IPv4 ó 16 bytes para IPv6, cuyo objetivo es identificar a un dispositivo dentro de una red. Este identificador le permite al dispositivo comunicarse con otros dispositivos conectados dentro o fuera de su red. IPv4 fue creada antes que IPv6 pero debido a la creciente expansión de redes, los 4 bytes (32 bits) para especificar direcciones resultaron ser muy poco, por lo que hubo necesidad de implementar IPv6 utilizando 16 bytes (128 bits) para direccionar equipos dentro de la red. Sin embargo el más utilizado en la actualidad es IPv4. [21]

### C. *Módulo de brazo robótico.*

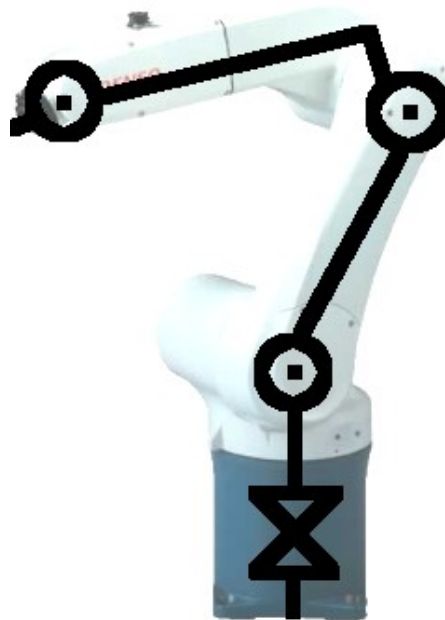
1. *Parámetros de diseño de un brazo robot.* Para el diseño de un brazo mecánico se deben tomar factores importantes como: grados de libertad, carga máxima a la cual se someterá, alcance máximo, espacio de trabajo, tipo de material, torque de motores. Todos estos factores varían según la aplicación del brazo. [24]

a. *Convención Denavit-Hartenberg (DH).* Esta convención es un método aceptado para el trazado de esbozos o diagramas de cuerpo libre en el diseño de brazos robot. Esta convención incluye el esbozo de traslación y rotación de las juntas. [24]

**Figura 11. Brazo robot de 4 grados de libertad [24]**



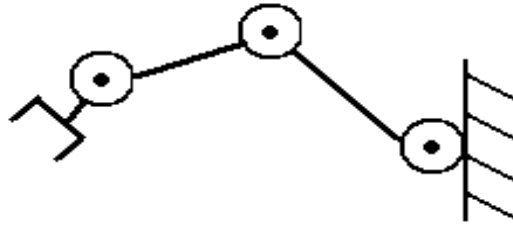
**Figura 12. Brazo robot utilizando la convención DH [24]**



Para fines prácticos, el efector final no se toma en cuenta en este tipo de diagrama, ya que usualmente la implementación de una pinza u otro similar es mucho más complejo. [24]

*b. Grados de libertad.* Se definen por el número de movimientos posibles que tiene una estructura, por ejemplo, en la Figura 22 se muestran 3 grados de libertad. A cada uno de los círculos mostrados en la Figura 22 se les llaman junta [24]

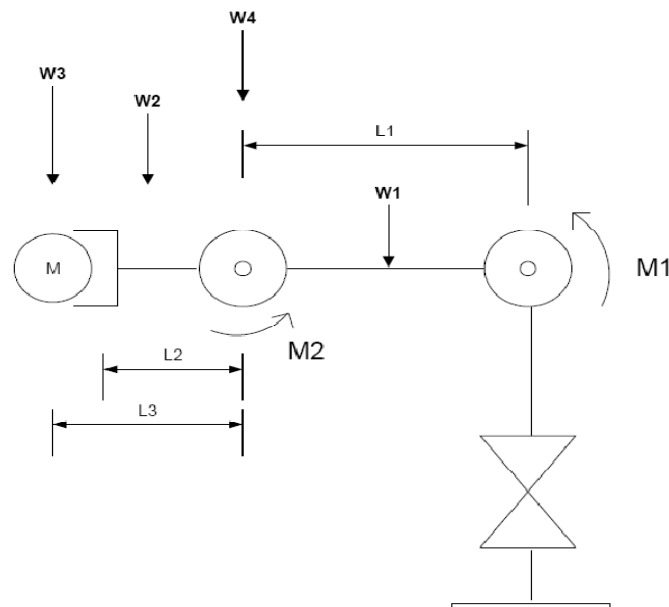
**Figura 13. Diagrama de cuerpo libre de un brazo**



*c. Carga máxima.* Para determinar el máximo peso que puede soportar el brazo es necesario determinar la función o utilidad del brazo, ya que de ello depende el tipo de motores que se pueden colocar en las juntas. [24]

Si el torque de las juntas es conocido, entonces se debe proceder a calcular el torque máximo aplicado al brazo cuando están en posiciones críticas (estado en que el brazo está completamente horizontal).

**Figura 14. Análisis de torques**



Torque en M1:

$$M1 = L1/2 * W1 + L1 * W4 + (L1 + L2/2) * W2 + (L1 + L3) * W3 \quad (3)$$

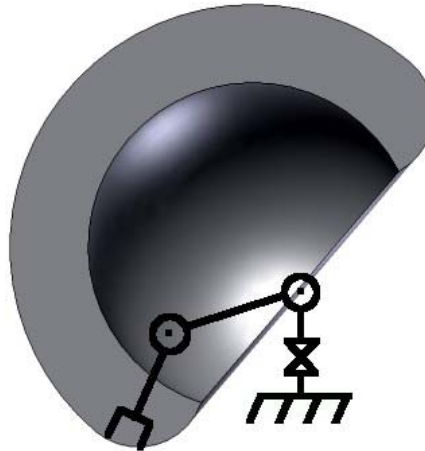
Torque en M2:

$$M2 = L2/2 * W2 + L3 * W3 \quad (1)$$

El análisis es de gran importancia, ya que con esto se determina la carga máxima que puede soportar el brazo cuando éste se encuentre en un estado horizontal.

*d. Espacio de trabajo.* El espacio de trabajo de una estructura es todo lugar que la pinza puede alcanzar. Esta depende del diagrama de cuerpo libre de la estructura y de las limitaciones de las juntas (ej. 180° de movimiento de un servo). Para establecer el área de trabajo de la estructura se debe tener en cuenta la aplicación requerida. [24]

**Figura 15. Espacio de trabajo. [24]**



*e. Cinemática directa.* La cinemática directa es un método que se utiliza para la determinación de la orientación y posición del efector final de un brazo robot, dependiendo de los ángulos de juntas y del largo de las uniones. El cálculo de este método consiste en trigonometría básica con el único fin de calcular la posición del efector final.

Tomando en cuenta el diagrama mostrado en la Figura 16, podemos determinar la posición de cada del efector final. El primer paso consiste en identificar las juntas J0, J1 y

J2. Con esto establecido se inicia asumiendo que la base se encuentra en las coordenadas  $x=0$ , y  $y=0$ . Luego se procede calculando la posición  $(x,y)$  de cada una de las juntas.

La junta J0 se encuentra en la posición  $x_0 = 0$ ,  $y = L_0$ , tomando en cuenta que la base está en la posición  $(0,0)$ . [24]

La junta J1 se encuentra en la posición:

$$\cos(\phi) = \frac{x_1}{L_1} \rightarrow x_1 = L_1 * \cos(\phi) \quad (2)$$

$$\sin(\phi) = \frac{y_1}{L_1} \rightarrow y_1 = L_1 * \sin(\phi) \quad (3)$$

La junta J2 se encuentra en la posición:

$$\sin(\theta) = \frac{x_2}{L_2} \rightarrow x_2 = L_2 * \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\cos(\theta) = \frac{y_2}{L_2} \rightarrow y_2 = L_2 * \cos(\theta) \quad (5)$$

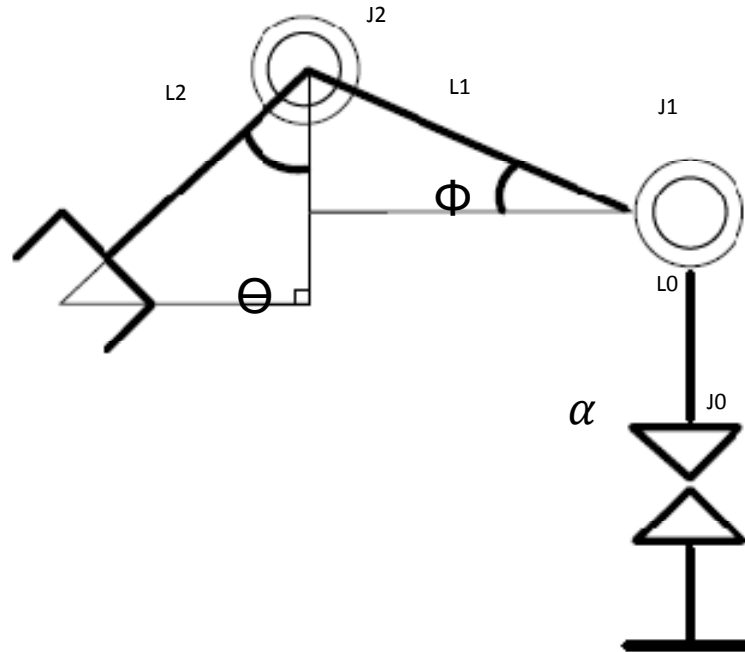
Determinando lo anterior, se puede obtener la posición del efector final al hacer una sumatoria de las coordenadas de cada una de las juntas.

$$x_0 + x_1 + x_2 = 0 + L_1 * \cos(\phi) + L_2 * \sin(\theta) \quad (6)$$

$$y_0 + y_1 + y_2 = L_0 + L_1 * \sin(\phi) + L_2 * \cos(\theta) \quad (7)$$

El ángulo alfa sólo indica la traslación del brazo en coordenadas cilíndricas.

**Figura 16. Diagrama para el cálculo de la posición del efector final**



2. *Sensores de presión (FSR).* Los FSR son dispositivos que contiene una capa de polímero, la cual tiene como resultado un decremento en la resistencia, a medida que se incrementa la resistencia aplicada en la superficie activa (ver ecuación 8).

El sensor de fuerza está optimizado de tal forma para poder utilizarse en el control del tacto humano en dispositivos electrónicos. Los FSR son ideales para medidas de presión precisas. [28]

En la Figura 18 se muestran las partes necesarias para la construcción de un sensor FSR. En esta se aprecian tres accesorios distintos, de los cuales sólo dos son indispensables para el cambio de la resistencia en función de la fuerza aplicada, estos se muestran en la Figura 19.

$$F \propto \frac{1}{R} \quad (8)$$

Figura 17. Construcción de un sensor FSR [28]

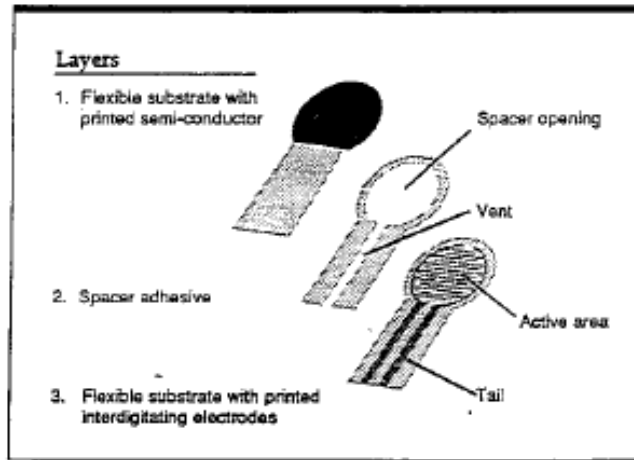


Figura 18. Esquema de un sensor FSR [28]

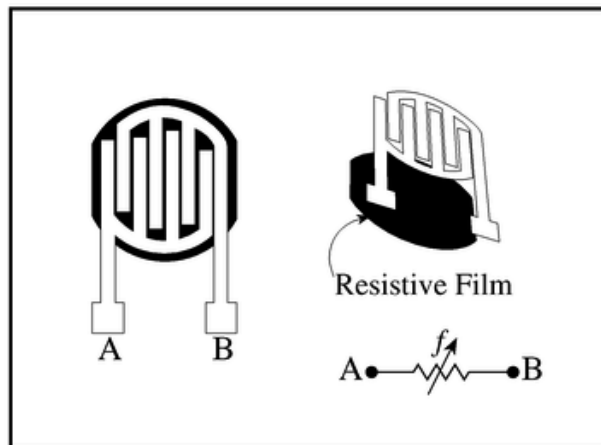
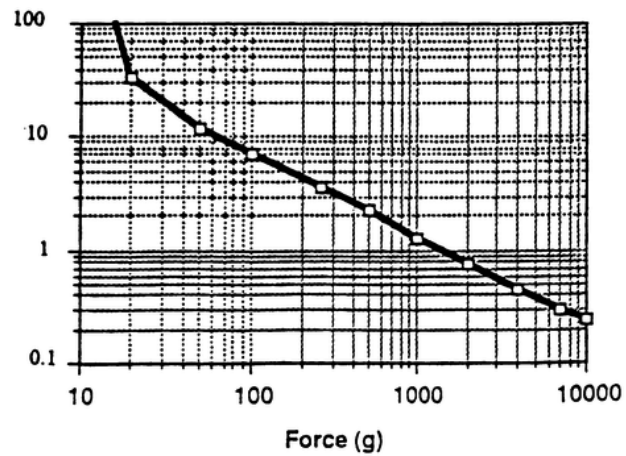


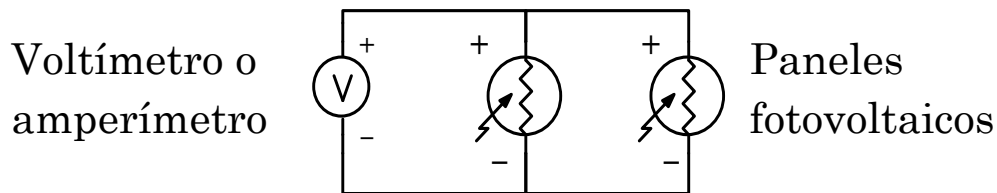
Figura 19. Resistencia en función de fuerza (g) [28]



D. *Módulo de energías alternativas.*

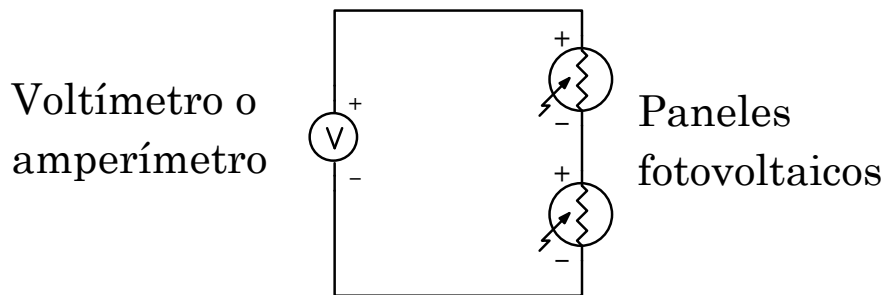
1. *Celdas fotovoltaicas.* Para entender de mejor manera el objetivo principal del presente módulo del megaproyecto es importante entender un poco sobre celdas fotovoltaicas. Una fotovoltaica es un aparato que convierte energía solar en energía eléctrica. Las celdas fotovoltaicas convertirán la energía solar en energía eléctrica, esto quiere decir que se puede tener una corriente eléctrica y un potencial eléctrico, con esto podemos alimentar un motor, circuito eléctrico o cualquier otro componente que requiera de energía. Las celdas fotovoltaicas tienen su limitante en términos de la cantidad de voltaje y corriente que pueden emitir, sin embargo poniendo celdas conectadas en serie nos pueden dar un voltaje más grande y conectadas en paralelo nos pueden dar una mayor corriente y de esta manera se pueden adaptar varias celdas solares dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. [17]

**Figura 20. Celdas en Paralelo [17]**



$$\text{Corriente total} = \text{Corriente panel 1} + \text{Corriente panel 2} \quad (9)$$

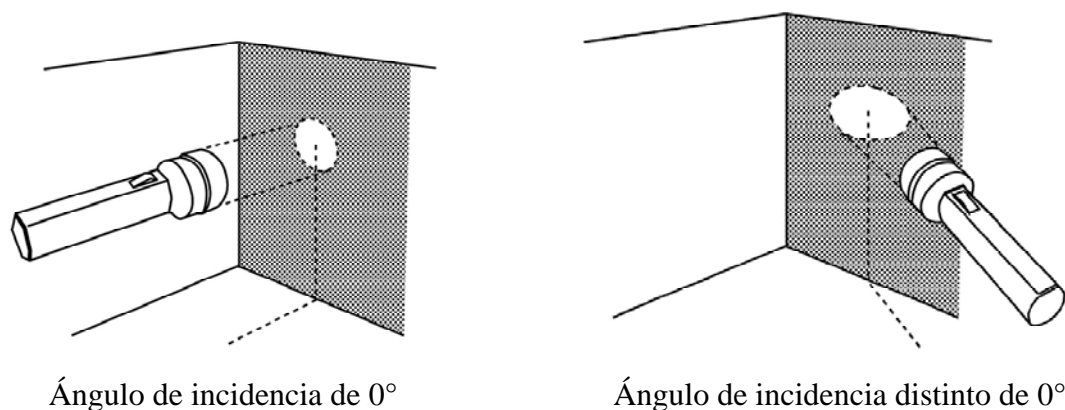
**Figura 21. Celdas en serie [17]**



$$\text{Voltaje total} = \text{Voltaje panel 1} + \text{Voltaje panel 2} \quad (10)$$

La cantidad de corriente y voltaje que pueden ser generadas por una celda fotovoltaica dependen de la intensidad de luz que reciban y el ángulo de incidencia de la luz sobre ellas. En forma sencilla, las celdas fotovoltaicas utilizan los fotones de la luz (partículas que transportan la radiación electromagnética) para excitar electrones que se encuentran en la celda y de esta manera generar una corriente eléctrica cuando estos electrones se empiezan a mover de un material semiconductor a otro (generalmente silicón). Entre mayor sea la intensidad de la luz, mayor la cantidad de fotones disponibles. El ángulo de incidencia de la luz sobre las celdas fotovoltaicas también determinan la cantidad de fotones que estarán disponibles para las celdas solares. Si el ángulo de incidencia sobre un pedazo de la celda es de  $0^\circ$  (la luz perpendicular a la superficie), la luz cubre un pequeño espacio del área superficial de la celda en donde todos los fotones se encuentran. Si el ángulo de incidencia aumenta, la luz cubre cada vez un pedazo de área más grande por lo que la misma cantidad de fotones se encuentran esparcidos sobre una superficie más grande por lo que cada pequeño pedazo de celda fotovoltaica recibe menos fotones. [12]

**Figura 22. Ángulo de incidencia [12]**



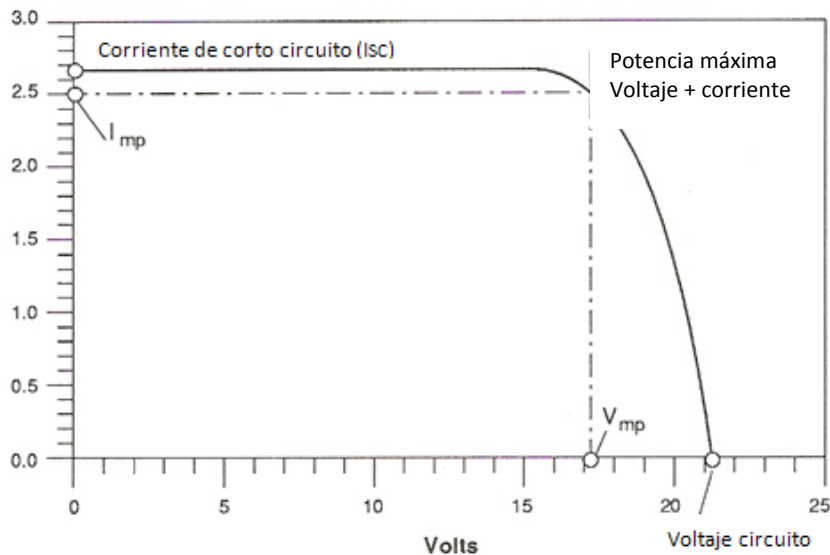
Como se puede ver en la Figura No. 22, cuando la linterna está alumbrando perpendicularmente a la pared (ángulo de incidencia de  $0^\circ$ ) la cantidad de luz emitida por la misma se encuentra concentrada en un pedazo de área. Cuando la linterna no está perpendicular a la pared (ángulo de incidencia distinto de  $0^\circ$ ), la luz esta esparcida sobre un pedazo de área más grande. Como la cantidad de fotones emitidos por la linterna es la

misma en ambos casos, cuando la luz está concentrada sobre un pedazo de pared, este pedazo está recibiendo la mayor cantidad de fotones posibles. Si la luz se esparce sobre un pedazo más grande de área, la cantidad de fotones también se esparce sobre esta área, dejando así una menor cantidad de fotones en cada pedazo. [12]

La teoría dice que si el ángulo de incidencia de una fuente de luz sobre una superficie aumenta, la cantidad de fotones por pedazo de área disminuye. Aplicando esto a la teoría de celdas solares se podría asumir que entre mayor sea el ángulo de incidencia, menor será la cantidad de energía solar que será convertida en energía eléctrica por lo que tendremos menor voltaje y menor corriente eléctrica. [12]

Un módulo fotovoltaico va a producir su corriente máxima cuando no hay resistencia en el circuito. Esto es cuando se hace un corto circuito entre las terminales positivas y negativas de los módulos. A esta corriente se le llama corriente de corto circuito. De manera similar, el voltaje máximo se produce cuando hay un circuito abierto y se le llama voltaje de circuito abierto. En este caso la resistencia entre las terminales del módulo es infinita por lo que no fluye corriente entre ellas. Estos dos extremos en resistencia de carga y todo el rango de condiciones entre ellas forman la gráfica I vs. V mostrada en la Figura No. 23. La corriente se expresa en amperios y el voltaje en volts. [1]

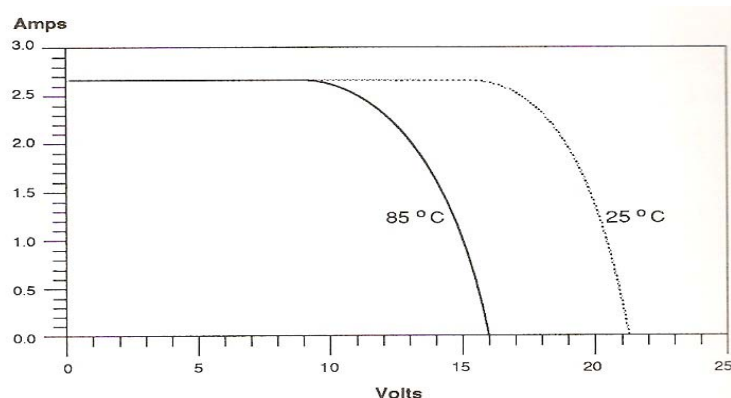
**Figura 23. Gráfica I vs. V típica [1]**



Como se puede ver en la Figura No. 23 la corriente de corto circuito ocurre en el punto de la curva cuando el voltaje es cero. El voltaje a circuito abierto ocurre cuando la corriente es cero. La potencia disponible de un módulo fotovoltaico en cualquier punto en la curva está expresada en Watts y se calcula multiplicando corriente por voltaje. Existe un punto en la “rodilla” de la curva donde la potencia es máxima. Esta gráfica asume que el módulo está en condiciones estándar, esto quiere decir que está directamente bajo luz de sol y que está a temperatura estándar. Condiciones estándar de luz solar se asume que son 1000 watts de energía solar por metro cuadrado. A esto se le llama “un sol” o “sol pico”. Menos de un sol puede reducir la corriente de salida del módulo. Si se tiene, por ejemplo, medio sol (500 watts por metro cuadrado) la corriente generada por las celdas fotovoltaicas disminuye a la mitad. [1]

Debido a que las celdas fotovoltaicas son semiconductores eléctricos, un sombreado parcial de los módulos puede causar que estas se calienten. Esto quiere decir que están actuando como conductores ineficientes en vez de cómo generadores eléctricos. Sombreado parcial puede afectar las celdas y tienen un efecto serio sobre la potencia de salida en hasta un 80%. Un módulo dañado también puede causar el mismo efecto que la sombra. La temperatura también puede afectar un módulo ya que temperaturas muy altas pueden reducir el voltaje entre 0.04 y 0.1V por cada grado Centígrado en aumento de temperatura. Debido a esto, los módulos no deben estar instalados directamente contra una superficie para permitir que aire circule por detrás de cada módulo para que su temperatura no aumente mucho y afecte el voltaje de salida. [1]

**Figura 24. Efecto de temperatura en la curva I vs. V [1]**



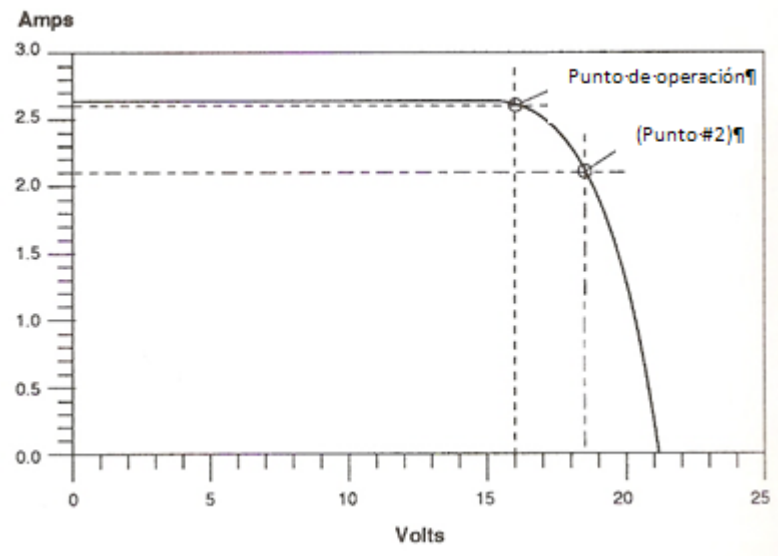
El último factor significativo que determina la potencia de salida de un módulo es la resistencia del sistema a la que está conectado. Si el módulo está cargando una batería debe darle un voltaje mayor al que tiene la batería. Si la batería está completamente descargada el voltaje de la batería es relativamente bajo. El módulo fotovoltaico puede cargar la batería con un voltaje bajo pero mientras la batería se acerca a carga completa el módulo se ve obligado a darle un voltaje más alto (punto #2 de la Figura 25). Eventualmente el voltaje requerido es mayor que el voltaje máximo del módulo. En este punto de operación (punto #1 de la Figura 25) la producción de voltaje es menor que el voltaje máximo generado por lo que la potencia también es menor. Debido a esto, si no se calcula bien la cantidad de módulos necesarios para el sistema estos se pueden ver dañados. [1]

Puede ser igual de dañino tener módulos que generen voltaje de más o módulos que generen menos voltaje de lo necesario. Dependiendo de la aplicación se puede decidir la cantidad de módulos necesarios, si se piensa que las celdas se van a calentar mucho entonces se deben poner más celdas por si hay pérdida en cada celda de igual manera se sigue teniendo el voltaje deseado en la salida. Por ejemplo, si en la salida se quiere tener suficiente voltaje para cargar una batería de 12V necesitamos tener un voltaje mayor a 12V para poder cargar las baterías completamente. Si las celdas se calientan, ya no se obtienen 12V en la salida y la batería no se podrá cargar. Para solucionar esto se ponen suficientes baterías como para tener más voltaje, por ejemplo 16V, y luego ya regular la salida para siempre tener 12V sin importar la pérdida en las celdas. [1]

Como se mencionó anteriormente, las celdas solares se pueden conectar en paralelo para obtener más corriente y mantener el mismo voltaje en el nodo de conexión o en serie para obtener más voltaje y mantener la misma corriente en la rama, a esto se le llama un arreglo fotovoltaico. Se puede hacer un arreglo en el que existan varios módulos conectados en serie con varios módulos conectados en paralelo para obtener, al mismo tiempo, más corriente y más voltaje en un punto. A la hora de hacer arreglos fotovoltaicos hay que tomar ciertas precauciones.

Si el sistema incluye un sistema de almacenamiento en baterías se debe evitar que las baterías se descarguen en las celdas fotovoltaicas cuando no hay luz solar ya que esto causará que las baterías pierdan su carga. Para evitar esto se agrega un diodo de bloqueo ya que este únicamente permite que la corriente fluya en un sentido. Generalmente se utilizan diodos schottky, ya que estos tienen una caída de voltaje de 0.3 volts en vez de los 0.7 volts comunes en diodos de silicio. Estas conexiones están mostradas en la Figura No. 26. [1]

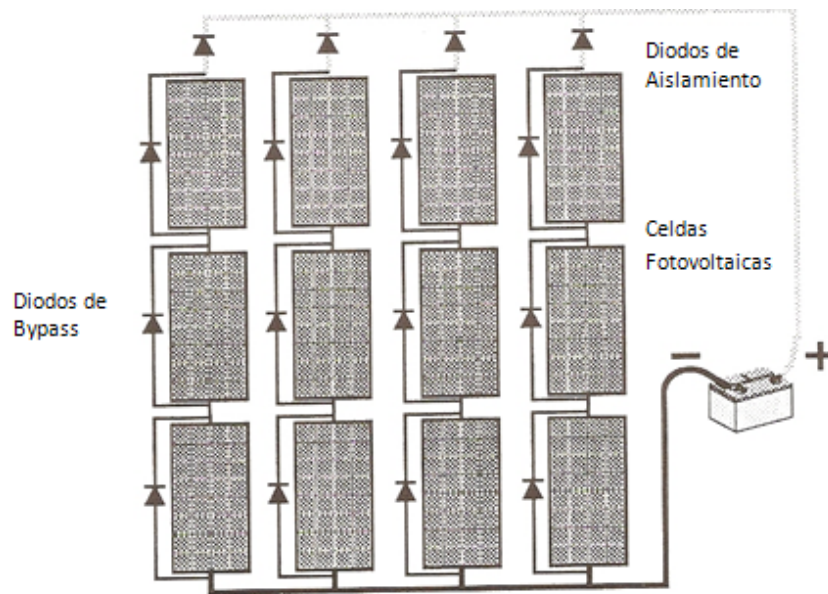
**Figura 25. Voltajes de operación al cargar una batería [1]**



Debido a que alguno de los módulos del arreglo pueden fallar en algún momento es importante protegerlos contra esto, ya que de lo contrario el módulo dañado en vez de generar electricidad se convertirá en una carga para el resto de módulos, esto quiere decir que va a consumir parte de la energía generada por los módulos que estén funcionando. Para evitar esto, se colocan diodos de bypass que van a permitir que si un módulo se arruina el resto de los módulos no se vean afectados. Si uno de los módulos se daña, el voltaje o corriente generado también se verá afectado, pero la energía generada por los módulos que sí están funcionando no perderán energía. También se deben considerar los diodos de aislamiento que no permiten que un arreglo en serie afecte a los demás arreglos que están conectados en paralelo al arreglo que se arruinó. Generalmente estos diodos de aislamiento se utilizan cuando se generará más de 48V y en este caso ya no se requiere de un diodo de bloqueo. [1]

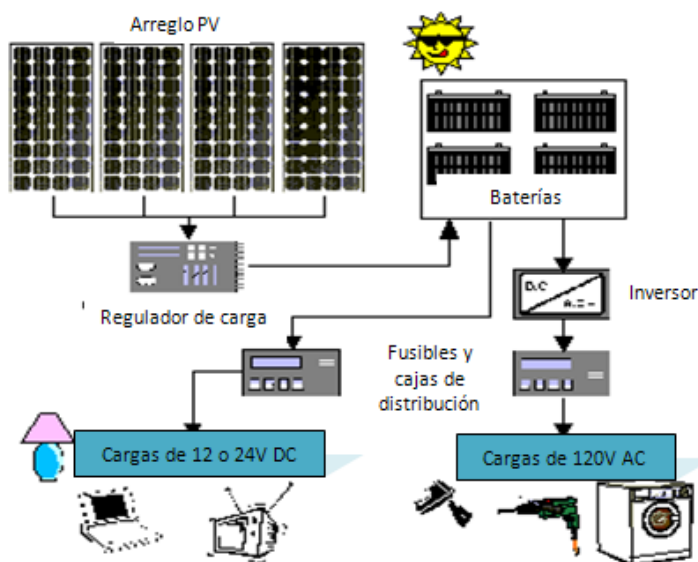
La Figura No. 26 muestra varios arreglos de celdas conectadas en serie y en paralelo. Se puede ver que en cada grupo en serie existe un diodo de bypass entre cada módulo y también existe un diodo de aislamiento entre cada conexión en paralelo. Si alguno de los módulos falla, la corriente podrá pasar por el diodo de bypass o aislamiento y dejando la celda dañada desconectada del resto del circuito. En caso no se generan más de 48V los diodos de aislamiento se pueden cambiar por un solo diodo de bloqueo que se colocará entre el nodo de conexión de todas las celdas solares y la terminal positiva de la batería. Si se tienen módulos que no generan mucho voltaje, esto quiere decir que tampoco van a consumir mucho voltaje en caso se arruinen. Debido a esto, si el voltaje generado por los módulos es pequeño entonces no es necesario tener diodos de aislamiento y es suficiente contar con un diodo de bloqueo. [1]

**Figura 26. Arreglo en paralelo-serie con diodos de bypass y aislamiento [1]**



La conexión a un sistema que tiene baterías para almacenar energía y que además tiene equipo eléctrico que requiere de electricidad se puede hacer como se muestra en la Figura No. 27. [17]

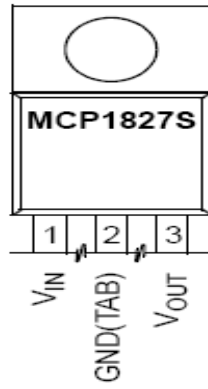
Como se puede ver en la Figura No. 27 el arreglo de celdas fotovoltaicas va conectado a las baterías y del mismo nodo salen las conexiones a los aparatos eléctricos.

**Figura 27. Conexión de un arreglo fotovoltaico [17]**

En el caso del rover no se requiere de un inversor ya que únicamente se utilizará corriente directa. Tampoco se requiere de fusibles y distribuciones de cargas debido a la poca cantidad de cargas y corriente consumida por estas cargas. El regulador de carga sirve para evitar que se sobrecarguen las baterías y para que las baterías no se descarguen en las celdas fotovoltaicas en momentos en los que no hay sol. Dependiendo del caso el diodo de bloqueo (o diodos de aislamiento) pueden ser suficientes para evitar que esto pase. [17]

2. *Reguladores de voltaje.* Un regulador de voltaje sirve para conservar el valor de salida de una fuente DC sin importar la cantidad de corriente que se esté suministrando. Los reguladores pueden ser fijos o variables. El regulador fijo proporciona un único voltaje de salida mientras que el regulador variable tiene una salida ajustable por el usuario. [3]

El circuito integrado MCP1827 de Microchip permite tener voltajes de entrada entre 2.3V y 6V con una salida fija de 5V y 1.5A. Este regulador tiene tres terminales, voltaje de entrada, voltaje de salida y tierra. [4]

**Figura 28. Circuito integrado MCP1827 [4]**

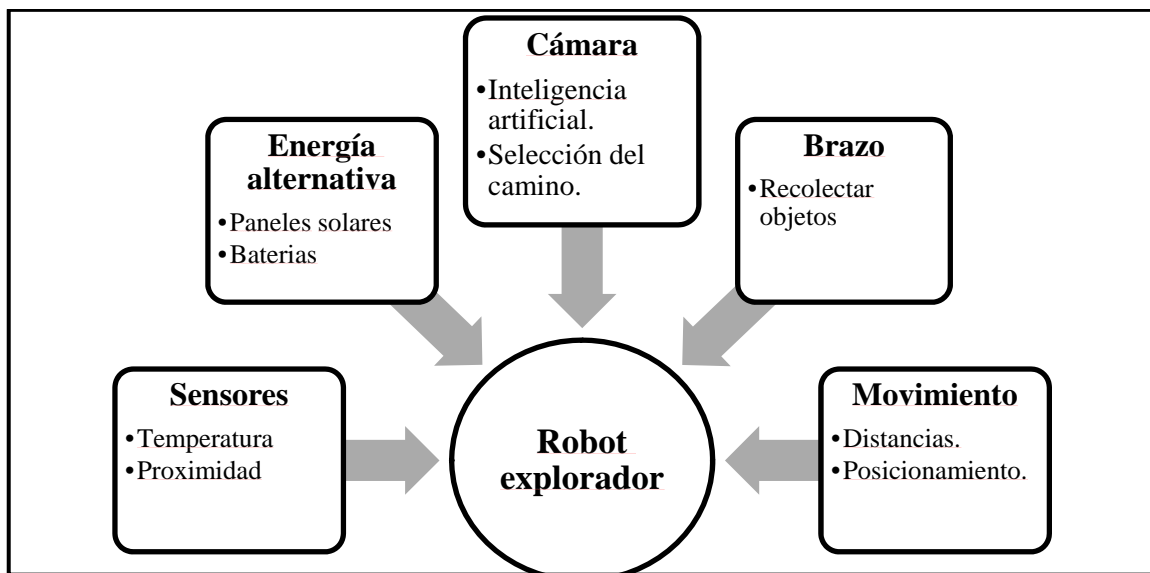
## IV. Delimitación del tema

---

El megaproyecto *Robot explorador* se realizó durante los últimos tres semestres de la carrera de Ingeniería Electrónica, período comprendido entre julio 2007 y noviembre 2008. Ésta es la continuación del megaproyecto desarrollado en 2005, llamado *Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autónomo*. El equipo de trabajo que dio continuación al proyecto está conformado por 4 estudiantes de Ing. Electrónica. Cada estudiante es responsable de un módulo:

- a. Control
- b. Visión por computadora
- c. Brazo robótico
- d. Energía solar

**Figura 29. Diagrama de bloques de módulos involucrados en el megaproyecto “Robot explorador”**



El objetivo de dar seguimiento al proyecto es mejorar el sistema de control y visión por computadora del robot y agregarle dos módulos nuevos: Energía alternativa por celdas

solares y brazo robótico. Además, se cambió el objetivo general del robot; de un robot explorador del terreno marciano a un robot limpia playas.

El *módulo de control* se concentra en el control de los movimientos del explorador mediante instrucciones recibidas del módulo de visión por computadora, y de la determinación del entorno que rodea al explorador. Se debió establecer un protocolo de comunicación para comunicar a módulos y sub-módulos que se encuentran dentro del explorador. también es el encargado de proporcionarle la potencia requerida a los motores para realizar los movimientos y controlar de manera eficiente al explorador, y de evaluar las condiciones ambientales que rodean al explorador, como la temperatura y obstáculos cercanos. El módulo llevó a cabo el diseño, implementación y optimización de los circuitos eléctricos que están encargados del movimiento y de obtener información del ambiente por medio de sensores. Los circuitos eléctricos permitirán al robot interpretar las instrucciones de movimiento y realizarlo, así como también obtener información del ambiente como la temperatura y posición de obstáculos que impidan el movimiento.

El *módulo de visión por computadora* se concentra en el procesamiento y análisis de imágenes, provistas por una cámara colocada sobre el robot, para determinar la trayectoria a seguir del mismo, al desplazarse por un ambiente tipo laboratorio, evadiendo obstáculos que se encuentren en su camino. El algoritmo implementado por dicho módulo, detecta obstáculos en la imagen adquirida por la cámara de red colocada sobre el robot. Dicho módulo estableció un canal de transmisión de datos inalámbrico, a través de una red WLAN, entre la estación central y el robot. El control del robot se lleva a cabo procesando imágenes en la estación central, transmitiendo la información obtenida del análisis, a través de la red WLAN, al PIC de telecomunicaciones en el ROVER que a su vez transfiriere la información recibida al PIC maestro del *Rover*, el cual mueve al robot. El PIC maestro del *Rover* es controlado por el *módulo de control*. Adicionalmente, el algoritmo le indica al *módulo del brazo robótico*, el momento en el que debe recoger basura, asegurándole una distancia prudente para que éste pueda alcanzarla. Toda instrucción dirigida al brazo robótico se transmite al PIC maestro del *Rover* para que éste la transmita a su vez al PIC que controla el brazo. El brazo lo dirige y controla por el *módulo de brazo robótico*.

Todo procesamiento se realiza en la estación central, la cual no es más que una computadora que se encuentra fuera del robot. Los algoritmos que procesan la imagen fueron implementados en C++ y compilados en una DLL. Estos algoritmos se invocan desde una GUI, en la estación central, desarrollada en Visual Basic. La GUI transmite la información hacia un PIC de telecomunicaciones en el Rover a través de una red WLAN.

El *módulo de brazo inteligente* consiste en el diseño, fabricación e implementación del brazo robot que lleva consigo el robot explorador autónoma, permitiéndole realizar la función fundamental para la cual fue hecho, recolección de basura. Los algoritmos de control del brazo se limita a la implementación de rutinas simples de búsqueda, en el cual no se utiliza el concepto de cinemática inversa, debido a que se requiere tener un análisis más complejo en donde el microcontrolador no llena las expectativas debido a la lentitud de procesamiento del mismo. El resultado del proyecto es el diseño e implementación de un brazo eficiente y robusto el cual tiene una pinza cuya apertura máxima es aproximadamente 12 cm. Además, el brazo consta de (uniones) las cuales están implementadas por medio de servomotores de alto torque.

La función principal del brazo robot inteligente es la recolección de objetos, la cual se lleva a cabo en conjunto con los módulos de visión por computadora y módulo de control. Una vez que el módulo de visión por computadora identifica algún obstáculo con características específicas (basura), se envía toda la información necesaria al módulo de control central que a su vez la retransmite al módulo del brazo inteligente para que éste ejecute la instrucción que le fue enviada.

El módulo de visión por computadora únicamente envía a control central una distancia aproximada del objeto a recolectar, por lo que el brazo robot también tiene la tarea de informar a control central la necesidad de desplazar el robot explorador hacia adelante. El desplazamiento depende de un sensor de proximidad infrarrojo colocado en la pinza adaptada al brazo robot inteligente. Una vez alcanzada la distancia deseada por medio del brazo robot inteligente, se cierra la pinza para sujetar el objeto, se inicia una nueva rutina de

movimiento en la cual se deposita el objeto en un recipiente colocado en la parte superior del robot explorador.

El *módulo de energía alternativa* se limita a implementar un módulo que le permita al Robot explorador tener alimentación eléctrica independiente de redes de energía eléctrica mientras este la necesitara para realizar sus distintas actividades. Se tenía como objetivo trabajar con la energía proporcionada por la luz solar y que esta se pudiera aprovechar al máximo con un arreglo de celdas fotovoltaicas que se pudieran orientar hacia el punto en donde se genere la mayor cantidad de energía eléctrica.

Entre las limitantes estipuladas para el módulo se encuentra que no se está generando la cantidad de energía real necesaria debido al alcance del proyecto. Únicamente se está alimentando los circuitos eléctricos y las baterías, pero no a los motores que hacen que el rover se mueva. Tomando en cuenta que el rover es un diseño experimental para ser usado en un laboratorio, no se consideró importante conseguir todas las celdas fotovoltaicas necesarias para un funcionamiento óptimo.

## V. Diseño experimental y resultados

---

El megaproyecto *Robot explorador* fue desarrollado durante los últimos 18 meses de la carrera de Ing. Electrónica en la UVG. Durante dicho período se desarrolló una serie de experimentos con el objetivo final de implementar el sistema de control el *robot explorador autónoma recolector de basura*.

A continuación se presentan varios experimentos que culminaron con la mejora del sistema de control del Rover. Se explican detalladamente las herramientas, estrategias y métodos utilizados en cada uno de ellos, así como los resultados parciales y finales de cada experimento.

Lista de experimentos:

- A. *Colocación de sensores de temperatura.*
- B. *Sensores de distancia.*
- C. *Control de movimiento.*
- D. *Sistema de control.*
- E. *Comunicación inalámbrica entre el robot y la estación central.*
- F. *Protocolo de comunicación entre la estación central y el PIC maestro del Rover.*
- G. *Algoritmo de búsqueda del Rover.*
- H. *Celdas solares.*

A continuación se detalla el diseño experimental y los resultados obtenidos de los experimentos realizados.

## A. Colocación de sensores de temperatura

1. *Diseño experimental.* Los sensores de temperatura pretenden informar al usuario y al mismo controlador maestro el estado del explorador. Esto lo hace midiendo temperaturas en puntos importantes del explorador, además de tener una temperatura de referencia (temperatura ambiente) para poder realizar comparaciones.

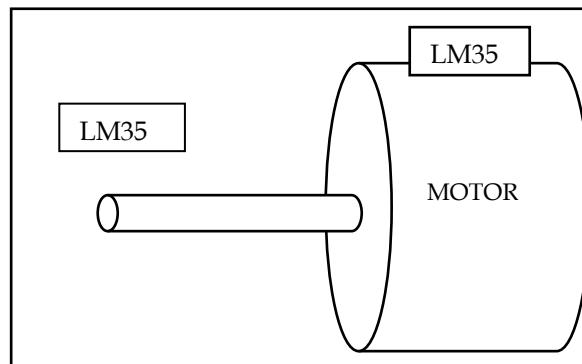
Se decidió colocar siete sensores de temperatura en todo el explorador.

Los sensores de temperaturas se colocaron en las siguientes partes:

- Un sensor en cada motor, para medir sobrecalentamientos.
- Un sensor en el alrededor del motor, para poder comparar sobrecalentamientos medidos.
- Dos sensores en parte de los circuitos, para prevenirlos de malos funcionamientos por sobrecalentamiento del entorno de los circuitos.
- Un sensor en la placa de sensores de temperatura que servirá como sensor de temperatura ambiente.

Los sensores de temperatura que se colocaron en los motores, se adhirieron a cada motor recubiertos con material aislante, para tener una mejor medición de los cambios de temperatura.

**Figura 30. Colocación de sensores de temperatura.**



2. *Resultados.* Con el sistema armado, se procedió a tomar distintas mediciones para poder determinar la precisión de los sensores de temperatura y las diferencias nominales existentes entre la distribución de los sensores dentro del explorador, bajo distintos escenarios, para así poder dar mediciones exactas de lo que está pasando en el explorador y no dar falsas alarmas por malas tomas y procesamiento de datos. Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Temperaturas del explorador en distintos escenarios.**

Funcionamiento	Ambiente	Motor	Motor	Motor	Motor	Circuito	Circuito
		A	A	B	B	1	2
<b>Detenido</b>	294	294	307	307	294	294	307
<b>Movimiento (después de 2 minuto)</b>	307	294	307	294	294	294	307
<b>Movimiento (después de 15 minutos)</b>	307	320	307	320	307	307	294
<b>Obstáculo breve</b>	294	320	294	307	307	294	294
<b>Obstáculo prolongado</b>	294	333	307	320	307	307	307
<b>Llantas atracadas</b>	307	333	294	320	294	282	294

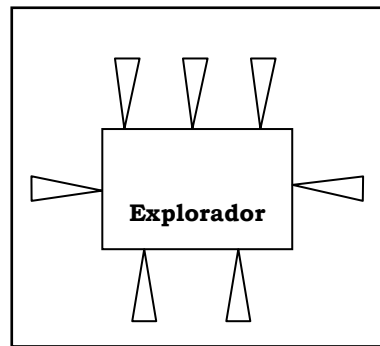
*B. Sensores de distancia.*

1. *Diseño experimental.* Para la medición de distancias, se utilizaron dos tipos de sensores, los SHARP GP2D12 y SHARP GP2D120. Estos sensores poseen un voltaje de salida analógico que representa la distancia a la cual se encuentra un objeto, dicha salida posee una forma exponencial.

La cobertura del explorador quedó de la siguiente manera.

- Sensores GP2D12 (alcance máximo de 80 cm.)  
3 – sensores en la parte de adelante del explorador.  
2 – sensores en la parte de atrás del explorador.
- Sensores GP2D120 (alcance máximo de 30 cm.)  
1 – sensor en cada lateral del explorador.

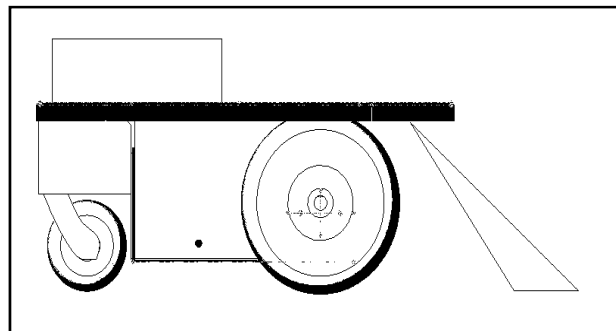
**Figura 31: Colocación final de sensores de proximidad.**



Para la determinación de agujeros en el terreno se utilizó el sensor SHARP GP2D15. Estos sensores poseen una salida digital la cual cuando hay un obstáculo a cierta distancia cambia de estado la salida del sensor.

Estos sensores se colocaron en la parte inferior del explorador, uno de cada lado, para así poder determinar si el explorador se dirigía hacia un agujero, y detenerlo.

**Figura 32. Colocación de sensores de agujeros.**

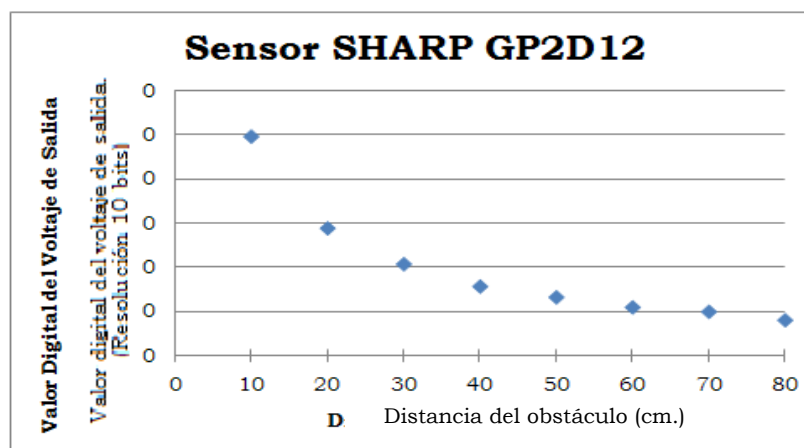


2. *Resultados.* Debido a que el explorador tiene dos tipos de movimiento, hacia adelante y hacia atrás, estas direcciones requieren de un mejor análisis de distancias para no colisionar con objetos no detectados, por lo que se procedió a ampliar la cobertura de obstáculos colocando tres sensores en la parte de adelante y dos sensores en la parte de atrás, como se muestra en la Figura 31. Estos sensores están separados de tal manera que se trató de cubrir la mayor parte del terreno.

**Tabla 3. Relación digital-distancia GP2D12**

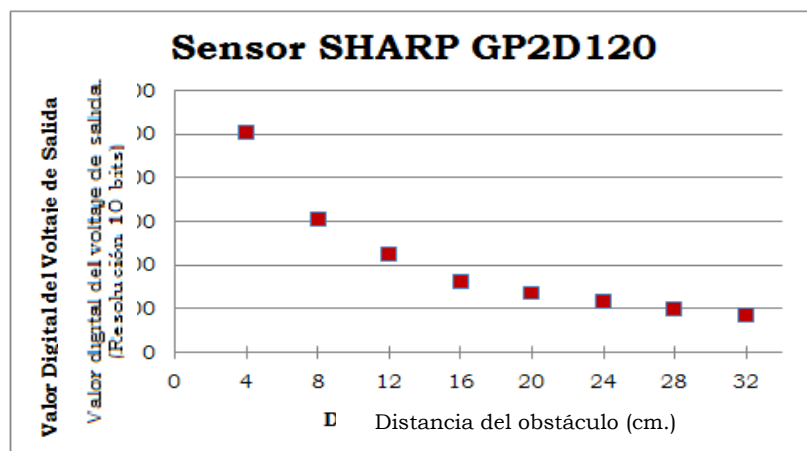
Distancia(cm)	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Promedio
10	983	1000	980	992	1002	991
20	573	580	577	583	570	577
30	410	412	420	413	420	415
40	315	315	305	323	312	314
50	262	265	280	260	260	265
60	225	210	220	223	220	220
70	201	195	200	203	201	200
80	164	162	150	170	163	162

**Figura 33. Valor de salida vs distancia GP2D12.**



**Tabla 4. Relación digital-distancia GP2D120**

Distancia(cm)	Sensor6	Sensor7	Promedio
4	1010	1007	1009
8	623	600	611
12	451	443	447
16	328	314	321
20	266	274	270
24	225	240	233
28	201	198	199
32	164	172	168

**Figura 34. Valor de salida vs distancia GP2D120**

### C. Control de movimiento.

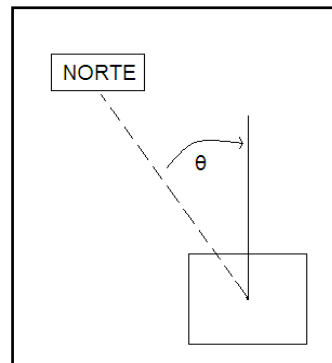
Es el encargado de dirigir el movimiento, razón mediante dos tipos de sensores:

- Brújula.
- Contador de pulsos.

La brújula es la encargada de dirigir correctamente los giros que se desean realizar, y el contador de pulsos es el sensor que se coloca en el eje de las llantas, el cual indica cuanto ha recorrido en distancia el explorador.

1. *Diseño experimental.* La brújula se colocó de tal forma que el ángulo respecto al norte tenga como referencia una línea imaginaria que sale del frente del explorador en forma perpendicular (formando un ángulo de  $90^\circ$ ). Es decir, la medición de la brújula indica el ángulo entre el norte y el plano paralelo al Robot explorador.

**Figura 35. Referencia de la brújula digital.**



La colocación de la brújula también se ve afectado por los circuitos cercanos a ésta, debido a que como cualquier brújula los campos eléctricos y magnéticos generados tanto por motores como por los circuitos de control afectan la medición. Por esta razón, se decidió colocar la brújula lo más alejado posible y lo más alto posible, por lo que se colocó en la parte superior de los circuitos eléctricos y se le hizo una caja de plástico para protegerla de aspectos externos.

La medición de avance se llevó a cabo por medio de la determinación de la frecuencia a la cual giran las ruedas en un movimiento. Esta información permite al encargado de control del explorador llevar control de ciertas variables como:

- Velocidad del explorador.
- Mantener ambos motores a la misma velocidad.
- Cantidad de distancia recorrida.

El diseño para realizar este sistema consistió en montar sobre el eje de las ruedas del explorador, discos transparentes marcados cada intervalo definido en el perímetro, el cual permite contar pulsos que se generan mediante este paso y obstaculización de la luz. Estos pulsos tienen dos controladores.

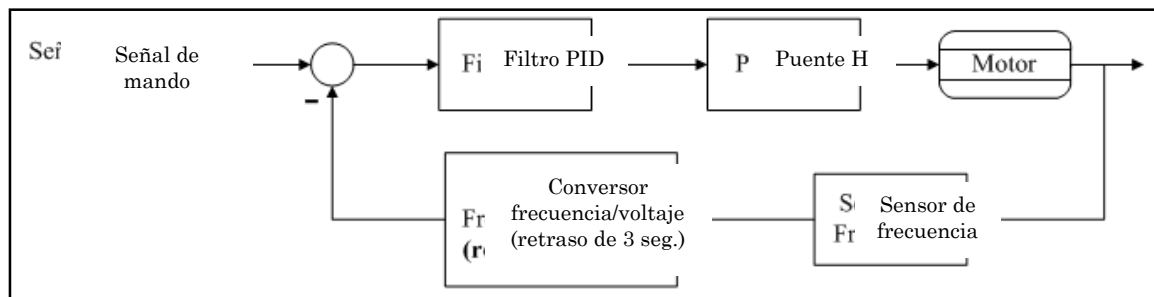
#### D. Sistema de control

La exactitud de los movimientos es de gran importancia, por esto mismo este módulo utiliza información de sensores internos para poder obtener el error del sistema y poder corregir las señales de alimentación a la siguiente etapa (etapa de potencia). Esto describe a un sistema de control de lazo cerrado, en el cual los elementos de retroalimentación son los sensores que indican la velocidad o frecuencia de giro de las llantas para corregir ambas rampas de movimiento.

Este microcontrolador realiza un lazo de control mediante un filtro PID, donde la señal de mando está dada por la rampa generada inicialmente, y la señal de retroalimentación es el voltaje que da el conversor frecuencia-voltaje que se tiene a la salida del sensor óptico. La salida de este microcontrolador es una señal de PWM que es la entrada a la siguiente etapa, que es la de potencia.

1. *Diseño experimental.* El lazo de control que se realizó en esta sección se muestra en la Figura 36.

**Figura 36. Lazo de control realizado.**



Se hizo una prueba para determinar la cantidad de pulsos que se producen en medio segundo dependiendo del ciclo de trabajo que se le esté ingresando al puente H. Los resultados se muestran en la Tabla No.5.

**Tabla 5. Cantidad de pulsos generados por el movimiento en medio segundo.**

Ciclo de trabajo	Cantidad de pulsos
255	25
240	24
220	21
200	20
180	18
160	15
140	12
120	9
100	7
80	4
60	1

*E. Comunicación inalámbrica entre el robot y la estación central*

1. *Diseño experimental.* Se debía establecer un canal de comunicación entre la estación central y el robot para transmitir datos, referentes al análisis de imágenes. Se requería que dicha comunicación fuese inalámbrica, ya que una comunicación alámbrica sería una solución poco práctica, dado que el robot debería acarrear consigo un cable por el terreno por donde se moviliza. Se pensó en utilizar un conjunto de protocolos de comunicación ya establecidos, con el fin de tener un canal de comunicaciones más robusto y confiable.

Se utilizó el estándar de capa de red *IEEE 802.3* (Ethernet), su versión inalámbrica *IEEE 802.11* y el protocolo de capa de transporte *UDP/IP*. Se colocó un router inalámbrico

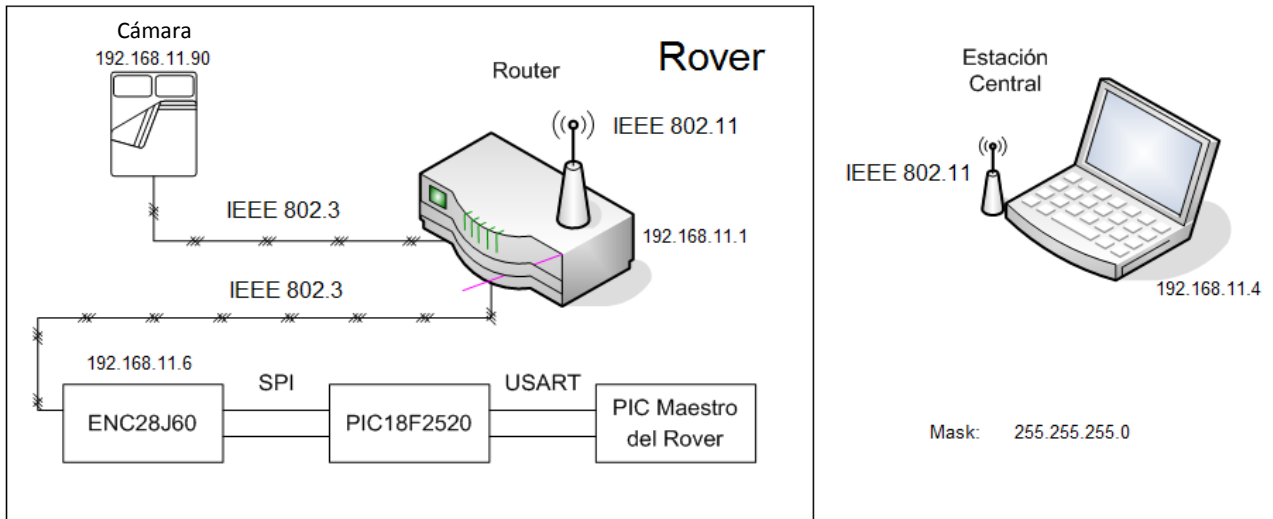
en el robot, con una velocidad de 54Mbps. A éste se conecta la cámara *Axis 205* y un *PIC18F2520*, *PIC de telecomunicaciones*, a través del módulo de *Ethernet ENC28J60*. La computadora en la estación central se conecta a dicha red inalámbricamente utilizando el protocolo *IEEE 802.11*, para recibir y transmitir información y órdenes a los equipos remotos. El controlador *ENC28J60* permite conectar un *PIC* con módulo *SPI* a una *Ethernet IEEE 802.3*, el router es quien se encarga de cambiar el formato a *IEEE 802.11* para que la información sea recibida y transmitida a la computadora en la estación central. La computadora utilizada fue una desktop con una tarjeta de red inalámbrica de 54Mbps, compatible con el protocolo *IEEE 802.11*. El sistema de comunicaciones se monta sobre una red *WLAN*, a través de la cual la estación central tiene acceso inalámbrico a los dispositivos remotos, cámara y *PIC de telecomunicaciones*.

En la estación central el programa de Visual Basic se debió incluir el componente *WinSock* que permite utilizar el protocolo de transporte *UDP/IP* en aplicaciones de Visual Basic. Tanto a la cámara, al *PIC de telecomunicaciones* y a la computadora en la estación central se les asignó una dirección *IP* fija. Por ello se deshabilitó el protocolo *DHCP* del router. El componente de *WinSock* se le debe indicar la dirección *IP* a la cual se está transmitiendo.

Se estableció exitosamente una canal de comunicación, a través de una red *WLAN* utilizando los protocolos *IEEE 802.3* y *IEEE 802.11* para capa de red y *UDP/IP* en la capa red y transporte para tener acceso remoto al *PIC maestro* del robot. La comunicación utiliza como intermediarios entre la *PC* de la estación central y el *PIC maestro* del robot, un *PIC de telecomunicaciones* (*18F2520*) que se conecta al router a través del módulo *ENC28J60*. La computadora central transmite la información de interés al router, éste la retransmite al módulo *ENC28J60* que a su vez la hace llegar al *PIC de telecomunicaciones*. Este traduce a *USART* la información recibida por *SPI* y la información es finalmente transmitida hacia el *PIC maestro* del *Rover*.

2. *Resultados.* Un diagrama de la red WLAN implementada se muestra en la Figura 37.

**Figura 37 - Red WLAN montada para transmisión de datos entre la estación central y el Rover**



#### F. Protocolo de comunicación entre estación central y PIC maestro del Rover

1. *Diseño experimental.* El protocolo de comunicación entre el *PIC maestro* del robot y la estación central debería satisfacer las necesidades de todos los módulos presentes en el robot y a la vez proveer de suficiente información a la estación central para la toma de decisiones. Este protocolo fue realizado en consenso por los dos módulos involucrados en el control del robot, *módulo de control* y *módulo de visión por computadora*. El protocolo se orientó a conexión con el fin de verificar que el robot estuviera activo antes de comenzar a enviar instrucciones, por lo que se debía definir el modo de entablar dicha conexión entre la estación central y el *PIC maestro*. El robot espera recibir 3 veces el número 200 de la estación central a lo que el robot le responde con un 175, confirmado que el canal está disponible para la transmisión de datos. Finalmente el robot espera la instrucción 210 que le confirma que la conexión fue realizada exitosamente, con lo que enciende el sistema de control del robot.

2. *Resultados.* El protocolo definido se orienta a byte, orientado a conexión y sin acknowledge. Los códigos del protocolo se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 6 - Código enviados por el PIC maestro del ROVER hacia la estación central**

Código binario	Código decimal	Procedencia	Instrucción
10101111	175	Rover	Confirmación de comunicación disponible
	...	x	
11011011	219	Rover	Movimiento hacia adelante o atrás terminado
11011100	220	Rover	Movimiento de giro terminado
	...	x	
11011101	221	Rover	Error en el tiempo de realización del movimiento
11011110	222	Rover	Error por la solicitud de movimiento y hay problema con la temperatura
11011111	223	Rover	Error por la solicitud de movimiento hacia adelante y hay un obstáculo
	...	x	
11100001	225	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 1
11100010	226	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 2
11100011	227	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 3
11100100	228	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 4
11100101	229	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 5
11100110	230	Rover	Error en la temperatura (movimiento o espera) motor 6
11101000	232	Rover	Error en un obstáculo (movimiento o espera) delantero izquierdo
11101001	233	Rover	Error en un obstáculo (movimiento o espera) delantero central
11101010	234	Rover	Error en un obstáculo (movimiento o espera) delantero derecho
11101011	235	Rover	Error en un obstáculo (movimiento o espera) agujero izquierdo
11101100	236	Rover	Error en un obstáculo (movimiento o espera) agujero derecho
	...	x	
11110000	240	Rover	Posición actual (el siguiente dato tiene la posición)
11110001	241	Rover	Posición inicial (el siguiente dato tiene la posición)
11110010	242	Rover	Posición final (el siguiente dato tiene la posición)
	...	x	
11110110	246	Brazo	Confirmación: Recoger basura
	...	x	
11111111	255	Rover	Error en la comunicación (la confirmación no fue la esperada)

*Nota: x = no utilizadas*

**Tabla 7 – Códigos enviados desde la estación central hacia el PIC maestro del ROVER**

Código binario	Código decimal	Destino	Instrucción
1000	8	Control	Solicitud de la posición actual
	...	x	
1010	10	Control	Solicitud de giro hacia la derecha de 0 a 345 grados en intervalos de 15
100001	33		
100010	34	Control	Solicitud de giro hacia la izquierda de 0 a 345 grados en intervalos de 15
111001	57		
111011	59	Control	Solicitud para ir hacia adelante de 5 a 100 centímetros en intervalos de 5
1001111	79		
1010000	80	Control	Solicitud para ir hacia atrás de 5 a 100 centímetros en intervalos de 5
1100100	100		
	...	x	
1101110	110	Control	Solicitud de todas las temperaturas medidas en el explorador
1111000	120	Control	Solicitud de los obstáculos alrededor del explorador
	...	x	
10000010	130	Brazo	Automático - Desplegar, búsqueda, recolección
10000011	131	Brazo	Reposo
10000100	132	Brazo	Despliegue
10000101	133	Brazo	Búsqueda
10000110	134	Brazo	Recolección
10001011	139	Brazo	Apagar brazo
10001010	138	Brazo	Resetear brazo
10001100	140	Brazo	Inicializar brazo
	...	x	
11110000	240	Control	Resetear Robot
	...	x	
11001000	200	Control	Prueba de canal de comunicación disponible
11111100	252	Control	Parar Rover
11111111	255	Control	Error en el carácter de confirmación.

*Nota: x = no utilizadas*

A continuación se describen los comandos utilizados para la comunicación entre el modulo de control y visión por computadora.

Instrucciones entre módulo de control y visión por computadora.

Se definieron cinco comandos:

1. *mover(+d) con ACK*

Comando utilizado para mover al Rover hacia delante.

- Límites de distancias que se puede mover el ROVER: Min distancia = +5cm, Max distancia = +80cm.
- Instrucciones de protocolo: 59-79, donde cada instrucción incrementa +5cm la posición del Rover.
- El ACK implementado deberá indicar al módulo de *Visión por computadora* que el Rover ha terminado la tarea que le fue asignada (219).

2. *mover(-d) con ACK*

Comando utilizado para mover al Rover hacia atrás, generalmente para los 10 cm que necesita el método de medir distancias.

- Límites de distancias que se puede mover el ROVER: Min distancia = -5cm, Max distancia = -80cm.
- Instrucciones de protocolo: 80-100, donde cada instrucción es un decremento de -5cm a la posición del Rover.
- El ACK implementado deberá indicar al módulo de *Visión por computadora* que el Rover ha terminado la tarea que le fue asignada (219).

### 3. *Parar al Rover*

Comando de paro al Rover (motores y brazo), no importando si éste ha cumplido o no la tarea que le fue asignada o tiene otra tarea en proceso o espera. Instrucción = 250

### 4. *giro(derecha) con ACK*

Comando utilizado para girar al Rover hacia la derecha de la cámara.

- Límites de giro del ROVER: Min giro =  $15^\circ$ , Max giro =  $345^\circ$ .
- Instrucciones de protocolo: 10-33, donde cada instrucción es un giro de  $+15^\circ$  sobre su eje a la derecha, a la posición original del Rover.
- El ACK implementado deberá indicar al módulo de *Visión por computadora* que el Rover ha terminado la tarea que le fue asignada. Instrucción = 220.

### 5. *giro(izquierda) con ACK*

Comando utilizado para girar al Rover hacia la izquierda de la cámara.

- Límites de giro del ROVER: Min giro =  $15^\circ$ , Max giro =  $345^\circ$ .
- Instrucciones de protocolo: 34-57, donde cada instrucción es un giro de  $+15^\circ$  sobre su eje a la izquierda, a la posición original del Rover.
- El ACK implementado deberá indicar al módulo de *Visión por computadora* que el Rover ha terminado la tarea que le fue asignada. Instrucción = 220.

Instrucciones entre el módulo de brazo robótico y visión por computadora

La rutina de recolección de basura tenía limitaciones en cuanto a peso y dimensiones de la basura que se recolectaría. Para ello se debió llegar a un acuerdo entre el *módulo de brazo robótico* y *módulo de visión por computadora*, acerca de las

instrucciones que se transmitirían para recoger basura. Realmente las órdenes no son enviadas directamente al módulo del brazo, sino del módulo de *Visión por computadora*, al *módulo de control* y éste lo retransmite al *módulo del brazo*. Se definió que el módulo de inteligencia artificial solo se comunicara con el módulo de control, para tener centralizado el control del robot. Se acercará al Rover a aproximadamente 20cm de la basura, tal que ésta quede alcance el brazo.

Se definieron tres comandos:

### 1. *Desplegar, búsqueda, recolección con ACK*

Comando utilizado al aproximar al robot a una distancia prudente de la basura, asegurando que está alineada enfrente del robot. En ese momento el módulo de *visión por computadora* delega el control del robot al módulo del brazo robótico. Se envía este comando al brazo para indicarle que se ha encontrado una basura y debe recogerla. El módulo del brazo toma control del robot y recoge la basura. Cuando el brazo cree haberla levantado y colocado en el basurero que el robot lleva encima, envía un código de ACK indicando que ha terminado la tarea.

- Límites de alcance del brazo: Min alcance = 5cm, Max alcance = 35cm.
- Instrucción de protocolo: instrucción = 130, ACK = 246

### 2. *Reposo*

Comando que se envía para asegurar que el brazo este fuera del rango de vista de la cámara. Indica al brazo que debe regresar a su posición inicial.

- Instrucción de protocolo: instrucción = 131

Características necesarias para el correcto funcionamiento de la rutina de recolección de basura:

1. El brazo deberá estar posicionado exactamente arriba de la cámara. De lo contrario, el sistema de control no podría asegurar al brazo que el objeto está alineado enfrente del robot. Y dado que el brazo solo tiene dos grados de libertad, hacia adelante, atrás, arriba y abajo, se debe asegurar que el objeto se encuentra alineado enfrente del robot para que el brazo pueda recogerlo.
2. El brazo incluye un sensor de presión ya que él sólo debe poder agarrar el objeto.
3. Se definió la distancia máxima y mínima de barrido del brazo en línea recta. Ya que esto definirá la distancia a la cual, el sistema de control de *visión por computadora* del robot delegará el control al módulo del brazo para que éste recoja el objeto.

### *G. Algoritmo de búsqueda del Rover*

1. *Diseño experimental.* El algoritmo de control del Rover fue diseñado con el objetivo de que éste pueda realizar la tarea de recolectar basura de forma autónoma. Éste envía instrucciones al PIC de control del Rover para que éste o ejecute las instrucciones, de ser dirigidas hacia él o reenvíe las instrucciones al módulo del brazo. El algoritmo hace uso del protocolo presentado anteriormente en las Tablas 3 y 4.

El ciclo del algoritmo inicia asegurándose que el canal de comunicación esté disponible y funcione adecuadamente. Envía 3 veces el código 200 al cual el Robot debe responder con el código 175 indicando que la comunicación está disponible y habilitada.

Una vez confirmada disponibilidad del canal, el ciclo automático de control inicia enviando al robot la instrucción de parar al robot (252), para asegurarse que éste se encuentre en reposo. Seguido envía el código de moverse hacia adelante la distancia máxima 100cm e inicia a tomar y escanear fotografías para determinar si se encontró un

obstáculo próximo al robot, al encontrarlo se para al robot (252) y se evalúa si el obstáculo encontrado es basura o obstáculo. De ser obstáculo, se envía la instrucción de girar 90° al robot (16). De ser basura se envía la instrucción al brazo de recolectar basura (130). Una vez se reciba la confirmación de cualquiera de los dos movimientos, se reinicia el ciclo del algoritmo.

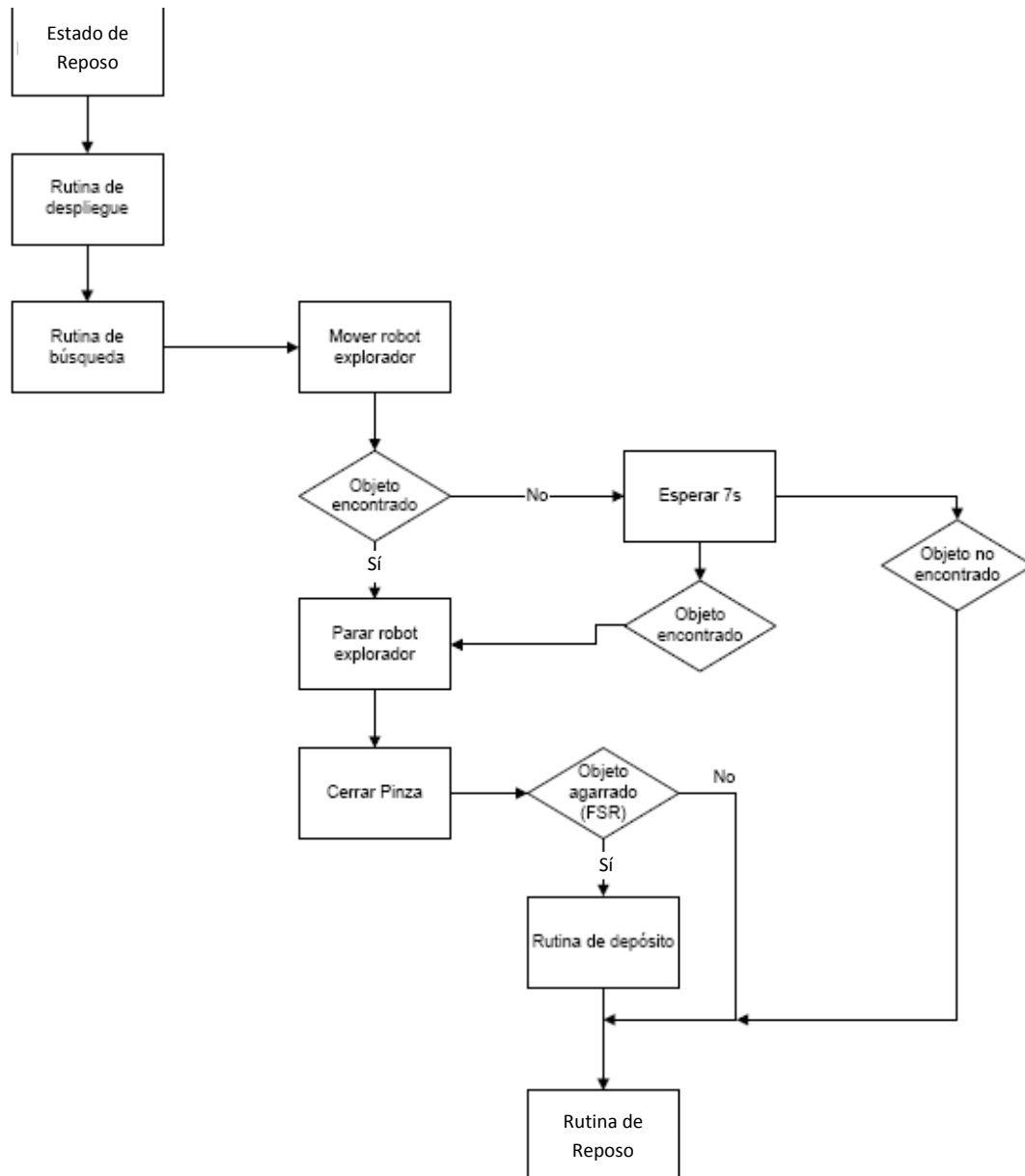
Se tienen 3 tipos de TimeOuts. El TimeOutComunicación termina el algoritmo automático en el caso no se reciban las confirmaciones del robot en menos de 1 minuto. El TimeOutRover reinicia el algoritmo automático ya que el robot no confirmó en menos de 1 minuto el giro del mismo. El algoritmo se reinicia ya que se vuelve a probar el canal de comunicación. El TimeOutBrazo se activa en el caso no se reciba la confirmación de la recolección de basura.

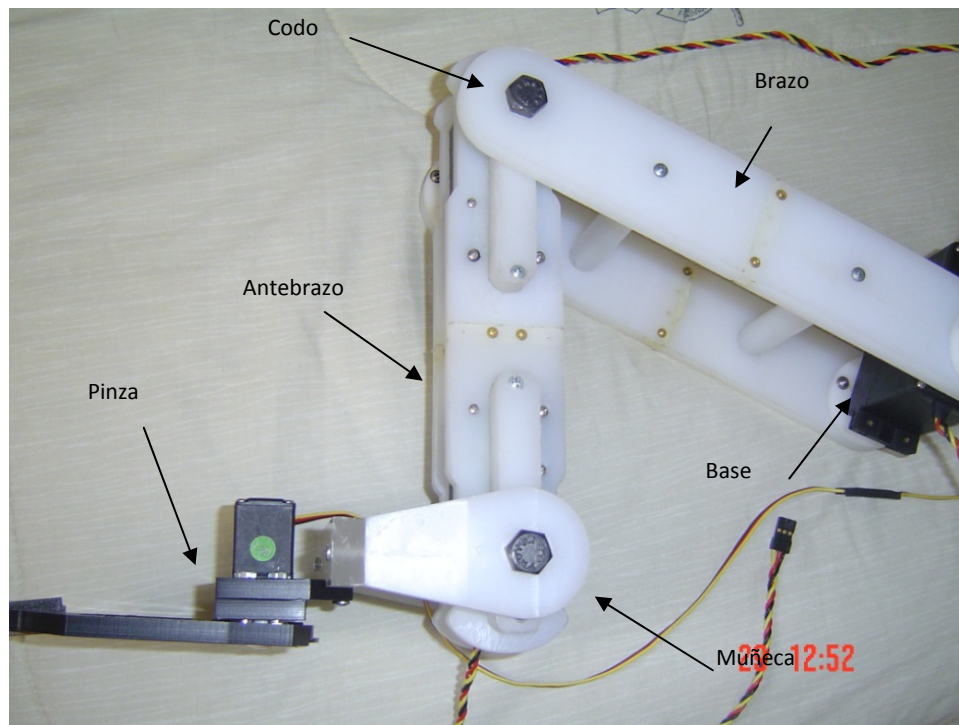
El brazo inteligente se diseñó e implementó bajo tres factores importantes: robustez, eficiencia y funcionalidad. Es por eso que el diseño es compacto, optimizando el peso muerto del brazo y el material utilizado (UHMW). Dado a la aplicación del robot explorador (recolección de objetos), el diseño del brazo consiste en una estructura con cuatro grados de libertad, cuyo espacio de trabajo se delimita en un plano  $R^2$ , cuyo alcance máximo es de 40 cm

El diseño del brazo incluye la adaptación de un resorte desde la base donde se encuentra adaptado el hombro, hasta la junta del brazo con el antebrazo. El resorte juega un papel importante en el brazo inteligente, ya que aumenta la carga máxima que soporta el brazo inteligente (100 g), y disminuye el consumo de corriente hasta un 50% cuando todos los motores están activos.

Para la inteligencia del brazo, fue colocado un sensor de proximidad en el extremo de la pinza, cuando se detecta un objeto a una distancia menor de 30cm. de la pinza, ésta indica a control central moverse hasta que la pinza se encuentre a una distancia en donde pueda sujetar el objeto.



**Figura 39. Algoritmo en modo automático del brazo inteligente.**

**Figura 40. Partes del brazo inteligente****Figura 41: Ensamblaje del brazo inteligente al robot explorador**

## H. Celdas solares

1. *Diseño experimental.* Para obtener los resultados deseados se siguieron una serie de pasos para lograr que cada parte del módulo funcionara adecuadamente. Estos pasos se muestran a continuación.

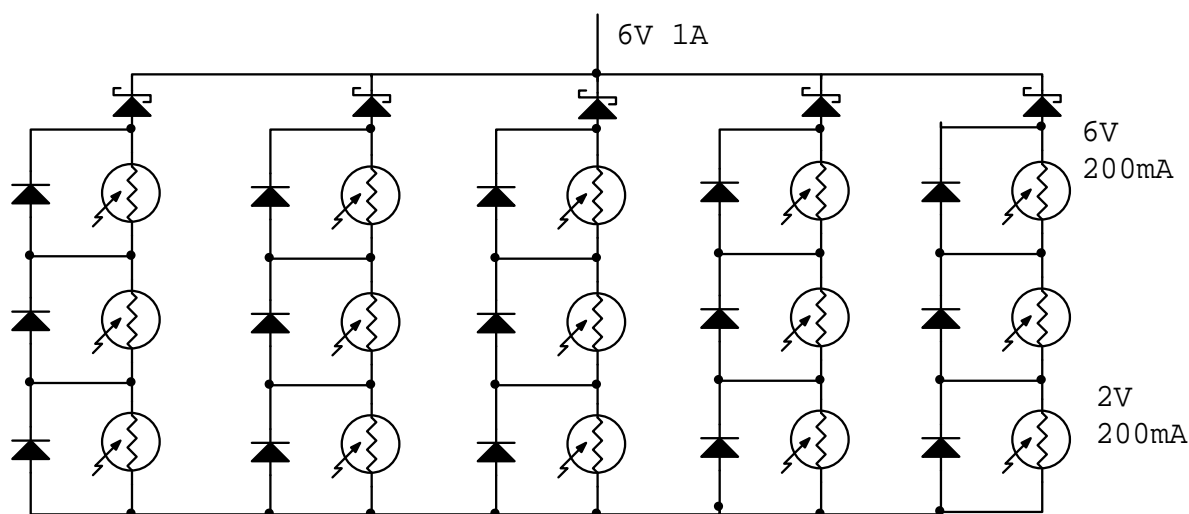
a. *Investigación de celdas solares, circuitos y regulador de voltaje.* Para decidir qué material se necesitaba para generar voltaje, regularlo y hacer la estructura mecánica del seguidor solar, se tomó en cuenta las necesidades y limitaciones físicas del Rover. El primer paso, y el más importante, era asegurarse que las celdas solares generaran suficiente energía eléctrica para alimentar todos los circuitos del Rover y cargar las baterías, por lo que se hizo una medición de las necesidades de potencia de los circuitos. Debido a que todos los circuitos son digitales se requiere de un voltaje de corriente directa de 5V, por lo que las celdas solares deben generar más de 5V y tener un regulador de voltaje para obtener este valor. Se hizo una medición de la corriente consumida por el Rover al estar en movimiento con todos sus módulos funcionando y se logró determinar que el Rover consumía aproximadamente 800mA, incluyendo también los circuitos de los nuevos módulos a ser agregados.

Al tener los datos de las necesidades eléctricas del Rover, se pudo hacer una investigación sobre las celdas solares y cuáles eran las más adecuadas para este proyecto. Muchos de los productos que se venden son arreglos de celdas solares que permiten tener distintos valores de voltajes y corrientes, pero están diseñadas para casas o empresas que requieren de voltajes y corrientes bastante elevadas. Como se mencionó en el marco teórico, estos arreglos de celdas solares que permiten tener valores de voltajes y corrientes más grandes consisten en conectar celdas en serie para obtener más voltaje y celdas en paralelo para obtener más corriente. Se decidió que lo más apropiado era comprar varias celdas solares y hacer los arreglos en serie y en paralelo para cumplir con las especificaciones deseadas y para obtener los precios más bajos posibles. Como se quería poder adaptar el arreglo de celdas solares al sistema mecánico del seguidor solar, comprar

celdas individuales y armar el arreglo era la opción que permitía hacer esto de una manera más adecuada, por lo que esta solución cumplía con los objetivos establecidos.

Las celdas solares elegidas para el trabajo fueron de marca Velleman Inc. y cada celda tiene la capacidad de generar 2V y 200mA. Tomando en cuenta que se quería tener, por lo menos, 5V y 800mA de energía generada se tomó la decisión de comprar suficientes celdas solares para generar 6V y 1A. Debido a que la cantidad de voltaje generada debe ser regulada entonces no importa si se genera un voltaje mayor al que se necesita. Los reguladores de voltaje requieren que el voltaje a ser regulado sea mayor que el voltaje de salida deseado, por lo que generar 6V era una opción viable. A pesar que se requería únicamente 800mA, se decidió generar 1A por si alguno de los módulos nuevos requieren más corriente de la establecida inicialmente. Para lograr generar 6V y 1A se debió comprar 15 celdas solares y tenían que ser conectadas como se muestra en la Figura No. 42. Esta figura muestra el circuito diseñado con CircuitMaker.

**Figura No. 42: Circuito de conexión de celdas solares**



Se puede ver que se tienen 5 grupos de celdas conectadas en paralelo y cada grupo contiene 3 celdas conectadas en serie. Como cada celda produce 2V, al conectar 3 celdas en serie se obtienen 6V y como cada una produce 200mA al conectar 5 en paralelo se obtiene 1A. Si se desea tener un voltaje de 6V constante en la salida es necesario conectar 5 grupos de celdas que generen 6V en paralelo y no 5 celdas solares en paralelo, ya que de lo

contrario existirá una caída de voltaje o de corriente. Se puede ver que al circuito se agregaron diodos de bypass y diodos de aislamiento. Se decidió que los diodos de bypass serían LEDs por si se arruina una celda solar se puede ver qué celda fue la que se arruinó. En el caso de los diodos de aislamiento se decidió que estos fueran diodos Schottky, ya que estos tienen una caída de voltaje menor que los diodos de silicio normal. Si un diodo de silicio tiene, generalmente, una caída de voltaje de 0.7V un diodo Schottky generalmente tiene una caída de aproximadamente 0.3V. Es necesario tener diodos de aislamiento para evitar que, si se arruina un grupo de celdas éstas actúen como cargas para las celdas que sí están funcionando. Los diodos de aislamiento tampoco permiten que las baterías se descarguen en las celdas solares durante momentos de poca luz como en la noche.

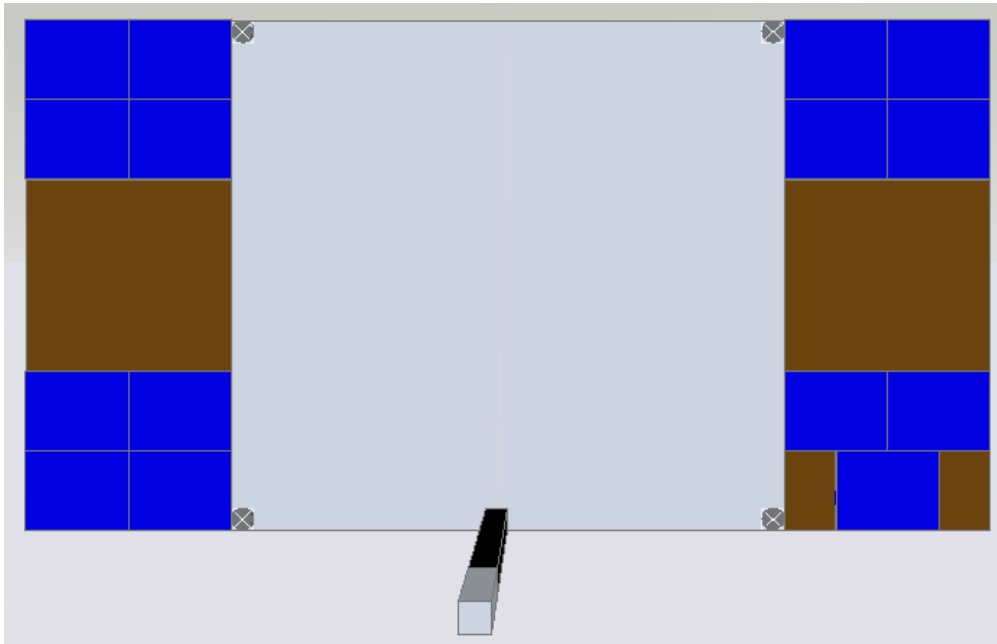
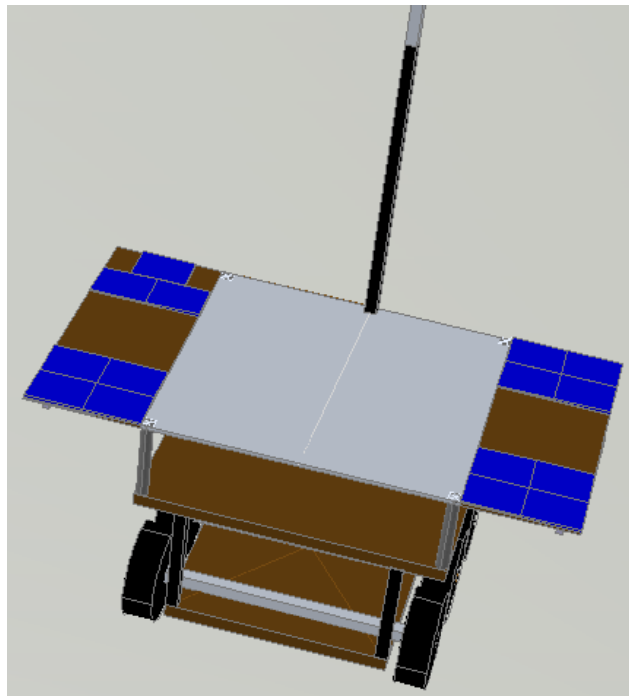
Debido a que el voltaje de salida era de 6V y la corriente máxima era de 200mA se quería encontrar un regulador de voltaje que aceptara este valor de voltaje y lo regulara a 5V, permitiendo pasar 1A de corriente como mínimo. El regulador de voltaje que se ajusta a estas necesidades fue el circuito integrado MCP1827 de Microchip que permite tener voltajes de entrada entre 2.3V y 6V con una salida fija de 5V y 1.5A. Debido a que el regulador de voltaje tiene como entrada las celdas solares y las baterías, sí es posible tener una corriente mayor a 1A y menor a 1.5A, aunque esto no debería ser necesario.

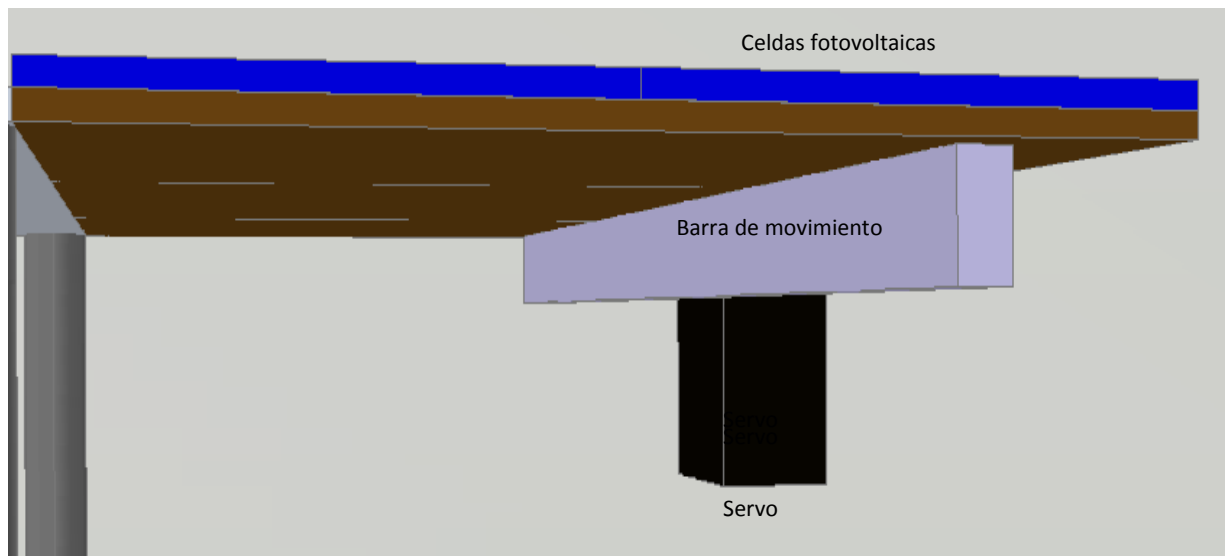
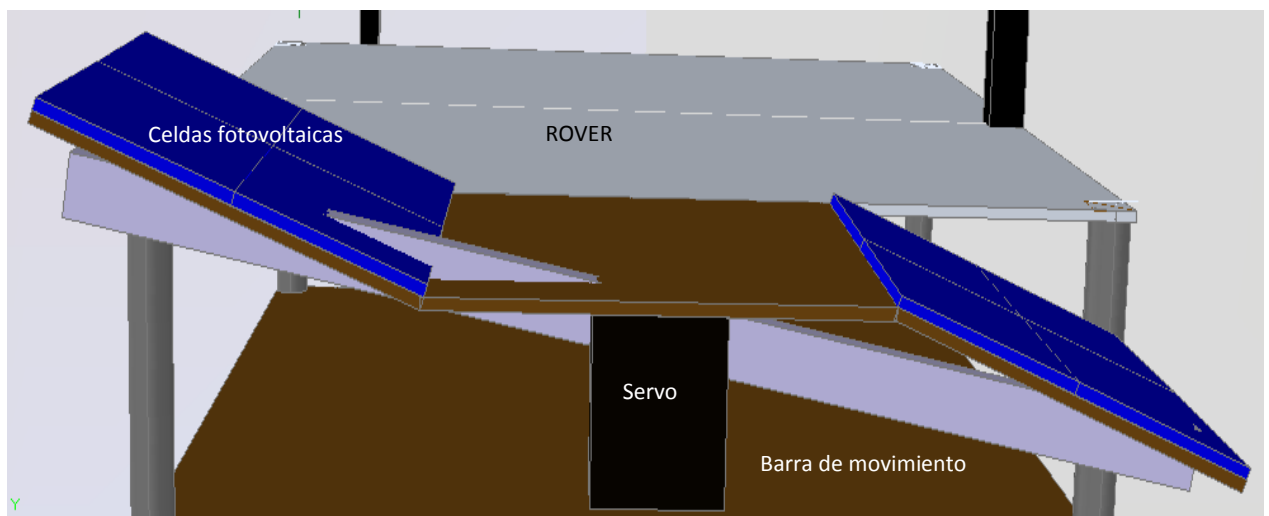
Las baterías que se utilizaron no se cambiaron, ya que para el megaproyecto del 2005 se hizo una investigación sobre qué baterías eran las más apropiadas [6]. Se escogió una batería recargable de 12V y 7A. Debido a que la nueva versión del explorador no requiere de 12V sino de 6V, se conseguirá una batería igual a la utilizada anteriormente pero que genere 6V y 7A. Si una batería se desea cargar con celdas fotovoltaicas se debe asegurar que el voltaje generado por las celdas sea mayor al voltaje al que se quiere cargar la batería. Esto quiere decir que si se desea cargar la batería a 6V entonces el voltaje mínimo que debe ser generado es de 6V. Si el voltaje generado es menor a 6V entonces no se podrá cargar la batería completamente. Debido a esto, se decidió que era apropiado generar un voltaje de 6V con las celdas solares. La corriente necesaria para cargar las baterías no está por encima de los 500mA, sobre todo si la batería no está completamente

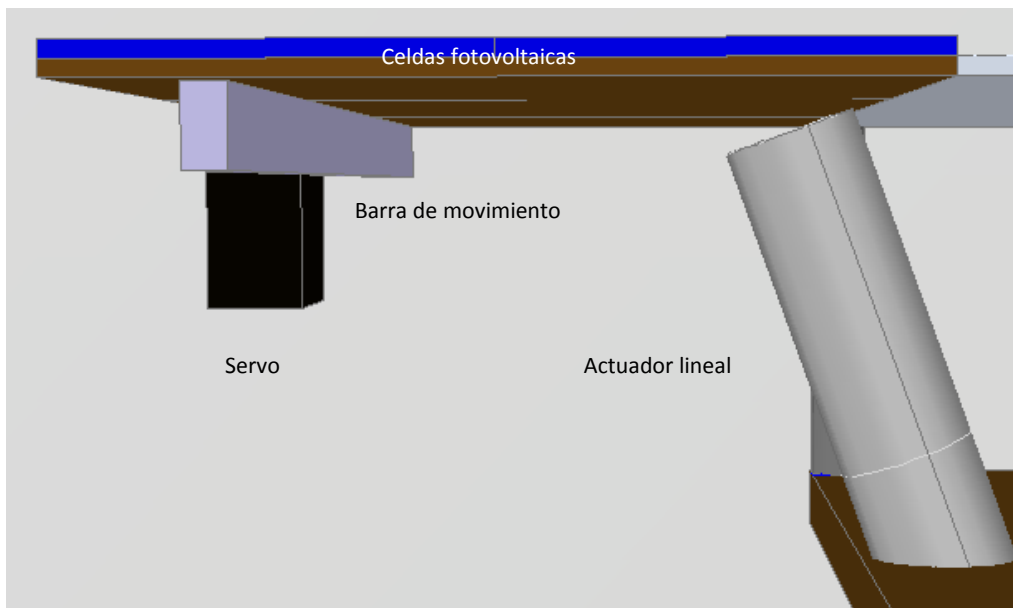
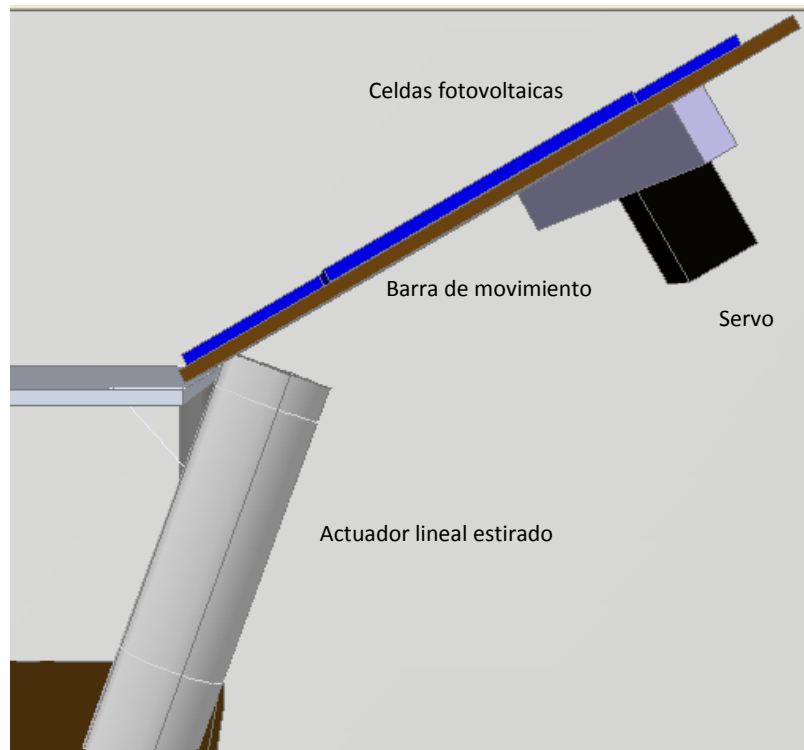
descargada. Esto quiere decir que las celdas solares pueden generar suficiente energía para cargar las baterías y alimentar los circuitos del Rover.

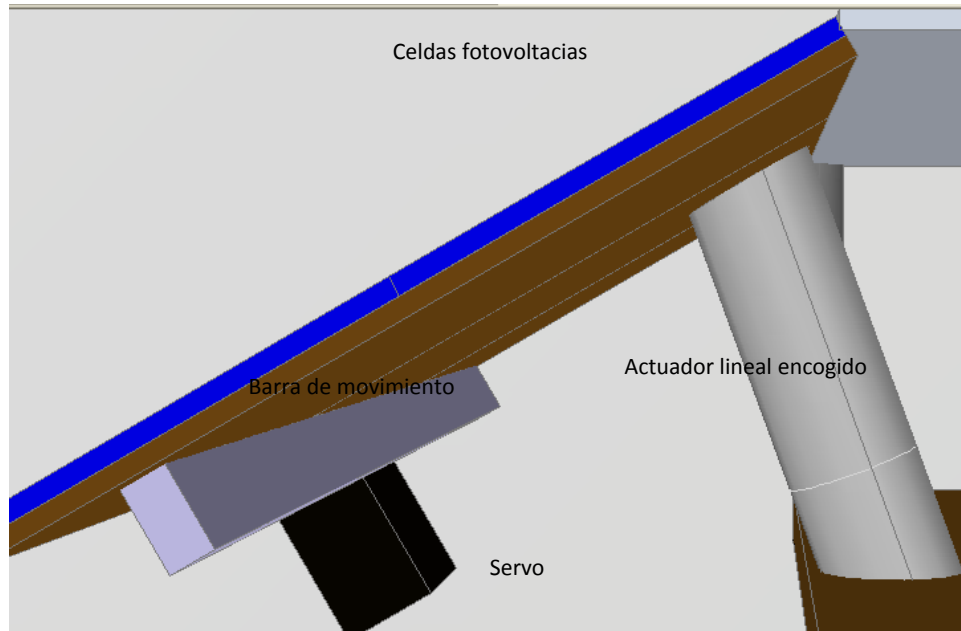
Debido a que se tienen que agregar diodos de bloqueo para protección de los módulos y para evitar descarga de las baterías durante la noche, el voltaje que alimentará las baterías nunca será 6V y oscilará entre 5.5V y 5.8V, dependiendo de la caída de voltaje del diodo. Esto quiere decir que las baterías nunca se cargarán completamente. También es importante mencionar que, tal como se mencionó en el marco teórico, al aumentar la temperatura las celdas solares generan menos voltaje. Al estar mucho tiempo bajo el sol la temperatura de las celdas empieza a aumentar y la generación de energía disminuye, por lo que en momentos las celdas tendrán un voltaje mucho menor de lo requerido y no podrán cargar las baterías ni alimentar los circuitos apropiadamente. La solución para este problema es poner más celdas fotovoltaicas, ya que al generar más voltaje las pérdidas ocasionadas por la temperatura nunca serán lo suficientemente grandes como para tener una salida de voltaje menor a los 6V. Esto también permite que la caída de voltaje ocasionada por los diodos no sea significativa. Para generar más voltaje, se debe agregar celdas a los grupos en serie mostrados en la Figura No. 42, esto quiere decir que para agregar 2V se deben conseguir por lo menos 5 celdas más. Debido a que el Rover únicamente será utilizado dentro de un laboratorio para demostraciones no fue factible comprar más celdas solares. Si se desean comprar más celdas se pueden hacer los cambios necesarios al circuito de una manera sencilla y esto permitiría evitar los problemas mencionados anteriormente.

Para realizar la estructura de movimiento de celdas fotovoltaicas se tomó en cuenta el torque necesario para mover la misma y la estética del Rover. También se tomó en cuenta que la estructura no causara interferencia a ninguno de los otros módulos. Se decidió usar actuadores lineales para mover las aletas con respecto al cuerpo del rover y utilizar motores servo para mover las celdas solares con respecto a las aletas. Para lograr que los servos no tuvieran que hacer tanta fuerza para mover las aletas, también se decidió hacer un pequeño cambio en el diseño de las mismas. El resultado se muestra en las Figuras No. 43 a 49.

**Figura No. 43: Diseño 3 del Rover. Vista desde arriba****Figura No. 44: Diseño 3 del Rover**

**Figura No. 45: Diseño de motores servo en el Rover****Figura No. 46: Diseño de motores servo en movimiento en el Rover**

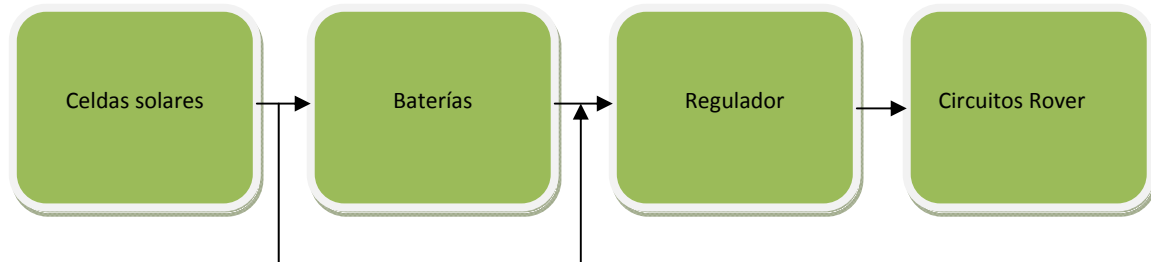
**Figura No. 47 Diseño de actuadores lineales en el Rover****Figura No. 48. Diseño de actuadores lineales estirados en el Rover**

**Figura No. 49. Diseño de actuadores lineales encogidos en el Rover**

En las Figuras No. 43 a 49 se puede ver el diseño final del Rover. Las aletas se diseñaron para tener celdas de ambos lados del servo y tener de esta manera una carga balanceada en ambos lados del motor. Esto permite que cuando el servo se tenga que mover, las celdas hagan torque contrario y de esta manera ayudan al motor a moverse. Esto quiere decir que el motor necesita menos torque y consume menos corriente. El motor tiene una barra de movimiento larga que es la que se mueve y hace que se orienten las celdas fotovoltaicas. Como el servo esta fijo sobre la aleta, las celdas solares se mueven con respecto a las mismas.

En las Figuras No. 47 a 49 también se puede ver la manera en que están colocados los actuadores lineales. Estos se ponen sobre el cuerpo del Rover y lo que hacen es empujar las aletas. Cuando el actuador lineal se alarga, empuja la aleta y causa que esta gire con respecto al cuerpo del Rover de abajo para arriba. Si el actuador lineal se comprime, la aleta regresa a su posición original y permite que esta gire de arriba hacia abajo. Cuando no se mueve el actuador lineal, la aleta descansa sobre él y se sostiene debido a la fuerza

generada por los engranes cuando el motor no está. La posición de los actuadores se debe calcular bien para obtener el máximo rango de movimiento posible y al mismo tiempo disminuir la cantidad de torque necesaria por el motor.

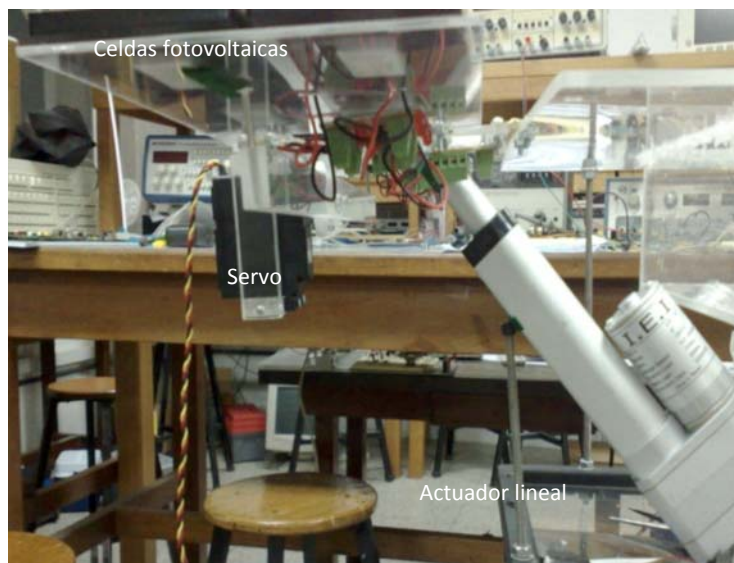


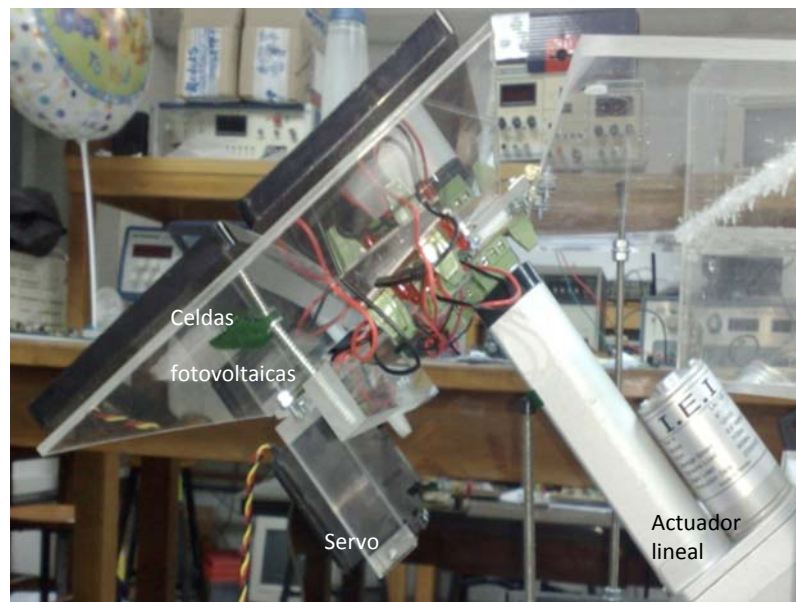
**Figura No. 50: Funcionamiento del módulo**

## 2. Resultados.

*a. Construcción de la parte mecánica.* Utilizando el diseño mostrado las Figuras No. 43 a 49 se procedió a construir la parte mecánica. Los resultados son mostrados en las Figuras No. 51 a 54

**Figura No. 51: Actuadores lineales en el Rover**



**Figura No. 52: Actuador lineal estirado en el Rover****Figura No. 53: Actuador lineal encogido en el Rover**

**Figura No. 54: Motores servo en movimiento en el Rover**



## VI. Discusión

---

El proyecto *Robot explorador* nace con la iniciativa de continuar el desarrollo de proyectos ya existentes en la UVG. Naturalmente antes de iniciar con una nueva implementación del sistema de visión del *Rover* se debía analizar las estrategias y métodos implementados en 2005 que conforman la base de esta nueva implementación. Esto se realizó con el fin de encontrar puntos clave en donde se pudieran realizar mejoras, que mejorarían el desempeño del robot.

El *módulo de visión por computadora* cambió la estrategia para el control del robot. Se decidió dirigir todo procesamiento de Inteligencia Artificial a imágenes adquiridas desde la cámara montada sobre el robot, a diferencia de como se realizaba en el megaproyecto del 2005.

La nueva propuesta permite al robot tener independencia total del entorno donde se desplaza, ya que la cámara está colocada sobre el vehículo y no suspendida sobre el terreno, simulando un satélite. Este cambio hace del robot un ente que depende solamente de la computadora en la estación central, que procesa todas las imágenes adquiridas.

El *módulo de visión por computadora* tomaría decisiones acerca de la trayectoria y recolección de basura del robot a través del procesamiento y análisis de imágenes adquiridas por la cámara de red montada sobre el robot. Dado que se debía controlar y adquirir imágenes de la cámara de red remotamente, desde el programa en la estación central surgió la necesidad de comunicar inalámbricamente al robot con la estación central, ya que no sería práctico que estuvieran conectados alámbricamente. Para ello fue necesario establecer un canal de transmisión de datos inalámbrico entre la estación central y el robot. Se eligió utilizar el protocolo *IEEE 802.3 (Ethernet)* y el protocolo *IEEE 802.11 (Wireless Ethernet)* que interconecta redes de área local inalámbricamente. Se incorporó un router, con un alcance máximo de 50m a la redonda, sobre el robot que permitiría la transmisión de datos entre el robot y la computadora. A ésta red inalámbrica se conecta la computadora en

la estación central. La red permite la comunicación entre todos los dispositivos conectados a dicha red: cámara Axis 205, PIC de telecomunicaciones y computadora en la estación central.

La aplicación utilizada para el control del robot se montó sobre el protocolo UDP/IP, en la capa de aplicación. Este tipo de protocolo permitió la transmisión de datos eficientemente. Los errores en la transmisión eran mínimos si no, nulos. El protocolo implementado incluía comandos que el PIC maestro del Rover re-transmitiría al brazo robótico cuando se le indicase la recolección de basura.

Con el fin de tener un control centralizado, toda instrucción dirigida al Rover es transmitida hacia el PIC maestro del *Rover*. De este modo, en todo momento el PIC maestro del *Rover* sabrá que está ocurriendo con el robot. Se determinó se debían apagar los sensores de proximidad del Rover cuando este se esté aproximando a la basura. Si la basura es alta, se detectará como obstáculo no contemplado y el módulo de control realiza un paro de emergencia. Los sensores detectan obstáculos a una distancia máxima de 10cm y mínima de 1cm.

Respecto al control del brazo por parte del módulo de *visión por computadora*, éste sólo le informará que recolecte basura cuando se posiciona al robot a 20cm de distancia de la basura y ésta esté alineada frente al robot. El módulo del brazo robótico deberá recogerlo por sí solo.

La definición de basura removible debió tomar en cuenta las limitaciones de los módulos de control, visión por computadora y del brazo robótico, ya que todos los módulos debían exponer sus limitaciones respecto a este tema. El módulo de brazo robótico, debido a la fuerza que tiene el mismo; y el módulo de visión por computadora debido al alcance del algoritmo implementado. Finalmente la estructura del Rover debía poder soportar la basura que éste recogería. Fue así como se llegó a un consenso y se estableció el tipo de basura que el robot podría recoger. Básicamente se definieron objetos de poco peso, rígidos y que habitualmente se encuentran tirados en playas.

El algoritmo de control se basa en la búsqueda de objetos que se encuentren frente al robot. El robot adquiere fotografías a una frecuencia de 1 fotografía cada 7 segundos. Se analiza cada fotografía en búsqueda de obstáculos y al reconocer una basura en la imagen se le indica al brazo que debe recogerla, delegando el control del robot al módulo.

El algoritmo controla los módulos de control y brazo robótico del Robot. Ya que el robot puede funcionar en modo manual o modo automático una vez iniciado el algoritmo de control automático se inicia la ejecución del algoritmo automático de control.

El robot implementado es eficiente y funcional a nivel de laboratorio. Éste esquiva obstáculos y recolecta basura.



## VII. Conclusiones y recomendaciones

---

### A. CONCLUSIONES

#### 1. GENERALES

- a. Se desarrolló exitosamente un proyecto multidisciplinario en el que se puso en práctica los conocimientos adquiridos durante los cinco años de carrera.
- b. Se desarrolló la optimización de un robot explorador autónoma que cumple con las características básicas de robots de este tipo. El robot es autónoma, auto sostenible y cumple con la tarea para el cual fue diseñado sin ayuda humana.
- c. Se implementó exitosamente un sistema de *visión por computadora* para controlar un robot explorador *limpia playas*, el cual recorre un terreno evadiendo obstáculos y recolectando basura.

### B. RECOMENDACIONES

1. Las condiciones en las que se trabajó este proyecto de graduación no son similares a las que se encontrarían en una playa. La luz del sol afectaría mucho el algoritmo de detección de objetos implementado, principalmente porque la cámara no detectaría grandes cambios de luz y ésta es la piedra angular de la técnica de localización de objetos. Además, al estar el robot en un ambiente

húmedo puede empañar el lente de la cámara lo que alteraría las fotografías. Se recomienda atención a este detalle al llevar al Rover a un escenario tipo playa.

2. El alcance del router actualmente instalado es de 50 metros radiales por el alcance de la señal de radio frecuencia del *router*, sin embargo al soltar al robot en una playa el alcance del robot debe ser mayor, ya que la estación de control generalmente estará más alejada del robot que 50 metros a la redonda, por lo que se recomienda que se cambie el router a uno con mayor alcance.

## VIII. Fuentes

---

### A. Bibliografía.

1. **Architectural Energy Corporation.** “*Maintenance and Operation of Stand-Alone Photovoltaic Systems*”. 1991. Albuquerque, NM, Estados Unidos, Photovoltaic Design Assistance Center. 192p.
2. **Mansilla, Juan Fernando.** “*Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autárquico. Submódulo de procesamiento de imágenes*”. Tesis Universidad del Valle de Guatemala, 2005.
3. **Mendizábal, José.** 2005. “*Solución de Electrónica de Potencia para un Sistema Explorador Robotizado y Autárquico*”. Tesis Universidad del Valle de Guatemala. 59p.
4. **Microchip Technology Inc.** “*MCP1827/MCP1827S*”. Chandler, Arizona, Estados Unidos, 2007. 32p.
5. **Mijangos, Luis Guillermo.** “*Diseño y construcción de un sistema explorador robotizado y autarquico, Submódulo de Control del Sistema Explorador a través de Internet*”. Tesis Universida del Valle de Guatemala, 2005.
6. **National Semiconductors Corporation,** *LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D Precision Centigrade Temperature Sensors*”. Laboratorio de National Semiconductors, Mayo 1994.
7. **Paredes, Carlos.** “*Limpian playa y calles del Puerto San José, Escuintla*”. Prensa Libre. Departamentales, 2008, Vol. 17 de marzo de 2008.

8. **S. M. García y E. B. Vidal**, “*Sensores de Proximidad Infrarrojos*”. Reporte de Electrónica Sensorial. 2004.

*B. Referencias de internet.*

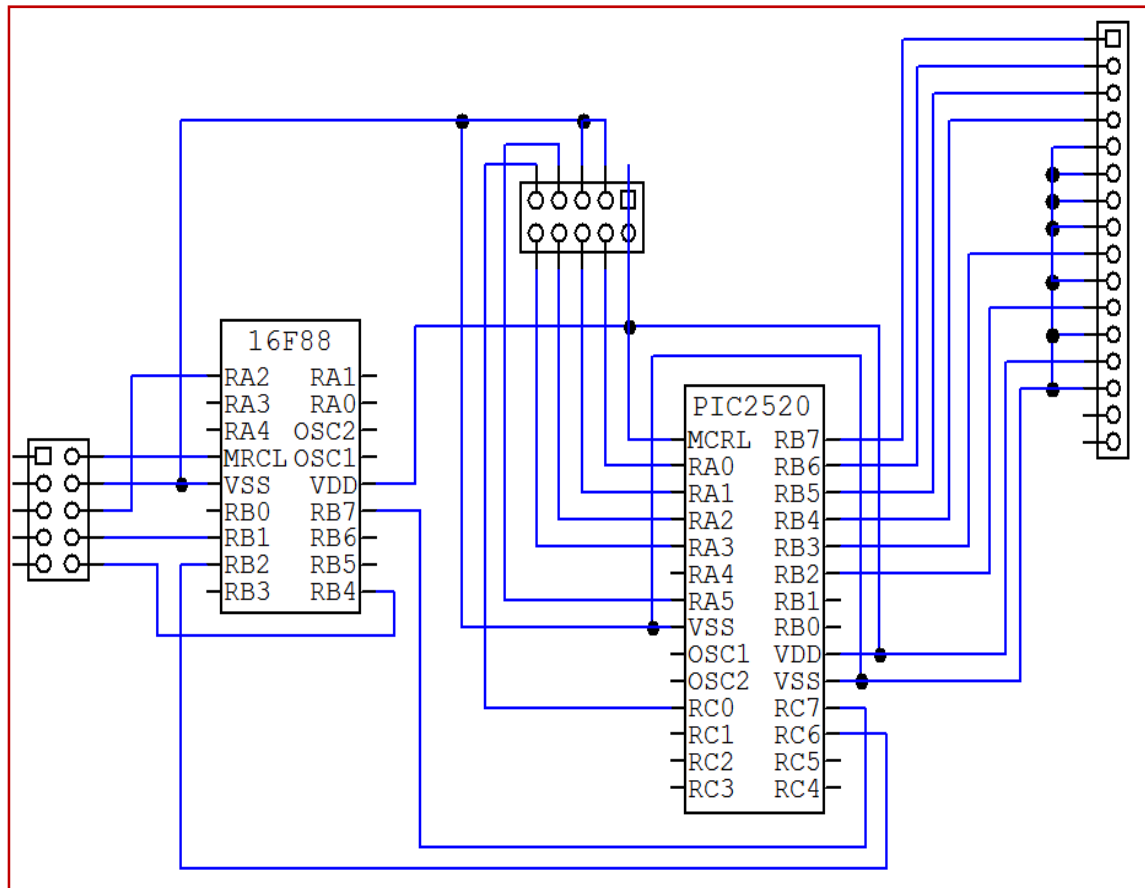
9. **Anastasia Phocas**. “*Tachometers – Uses and Various*”. [En línea]. 23 de agosto de 2006. [http://ezinearticles.com/?expert=Anastasia\\_Phocas](http://ezinearticles.com/?expert=Anastasia_Phocas)
10. **Axis Coorporation**. “*Axis Comunicaction. Tecnología de las cámaras de red*”. [En línea]. 2007.  
[http://www.axis.com/products/video/camera/about\\_cameras/netcam\\_tech.es.htm](http://www.axis.com/products/video/camera/about_cameras/netcam_tech.es.htm).
11. **Axis Coorporation**. [En línea]. 2008. [www.axis.com](http://www.axis.com).
12. **Bonneville Power Administration**. Fecha de visita: 27-11-08. “*Solar Panels*”. [En línea]. Fecha de publicación: 15-01-04  
[www.bpa.gov/energy/n/projects/fuel\\_cell/education/Docs/2-SolarPanelOrientation.pdf](http://www.bpa.gov/energy/n/projects/fuel_cell/education/Docs/2-SolarPanelOrientation.pdf)
13. **Corletti, Alejandro**. “*Clasificación de Protocolos*”. [En línea]. Sin fecha de última actualización.  
[http://www.gestiondominios.com/articulos/clasificacion%20de%20protocolos%20\(AlejandroCorletti\).pdf](http://www.gestiondominios.com/articulos/clasificacion%20de%20protocolos%20(AlejandroCorletti).pdf)
14. **Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores**. Universidad de Granada. “*El Bus I2C*”. [En línea]. Sin fecha de última actualización, [http://atc.ugr.es/~afdiaz/fich/bus\\_i2c.pdf](http://atc.ugr.es/~afdiaz/fich/bus_i2c.pdf)

15. **E. J. Carletti.** Robots Argentina, pasión por la robótica en Argentina. “Comunicación – Bus I<sup>2</sup>C Descripción y funcionamiento”. [En línea]. 25 de julio de 2008, [http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion\\_busI2C.htm](http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm)
16. **E. Martinez.** Telecommunity, “Protocolos de comunicación”. [En línea]. 21 de julio de 2007.  
<http://eveliux.com/mx/index.php?option=content&task=view&id=177>.
17. **How Stuff Works.** Fecha de visita: 27-11-08. “How Solar Panels Work”. [En línea]. Fecha de publicación: No existe.  
<http://science.howstuffworks.com/solar-cell4.htm>
18. **Huidobro, José Manuel.** “Wi-Fi”. [Online] 2007.  
<http://www.monografias.com/trabajos14/wi-fi/wi-fi.shtml>.
19. **Instituto de Tecnología de California (California Institute of Technology).** “¿Qué es el Infrarrojo?”. [En línea]. Sin fecha de última actualización.  
[http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/learn\\_ir/](http://www.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/learn_ir/)
20. **J. L. Giordano.** “La Brújula”. [En línea]. 21 de marzo de 2006.  
<http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=22>
21. **Proxim.** “What is a Wireless LAN?”. [En línea]. 2007.  
<http://sss-mag.com/pdf/proximwhatwlan.pdf>.
22. **Robótica & uC PIC X-ROBOTICS.** “Sensores”. [En línea]. 28 de agosto de 2008. <http://www.x-robotics.com/sensores.htm#gp2d>
23. **Robots Argentina.** Pasión por la robótica en Argentina. “Sensores – Conceptos generales”. [En línea]. 25 de julio de 2008.  
[http://robots-argentina.com.ar/Sensores\\_general.htm](http://robots-argentina.com.ar/Sensores_general.htm)

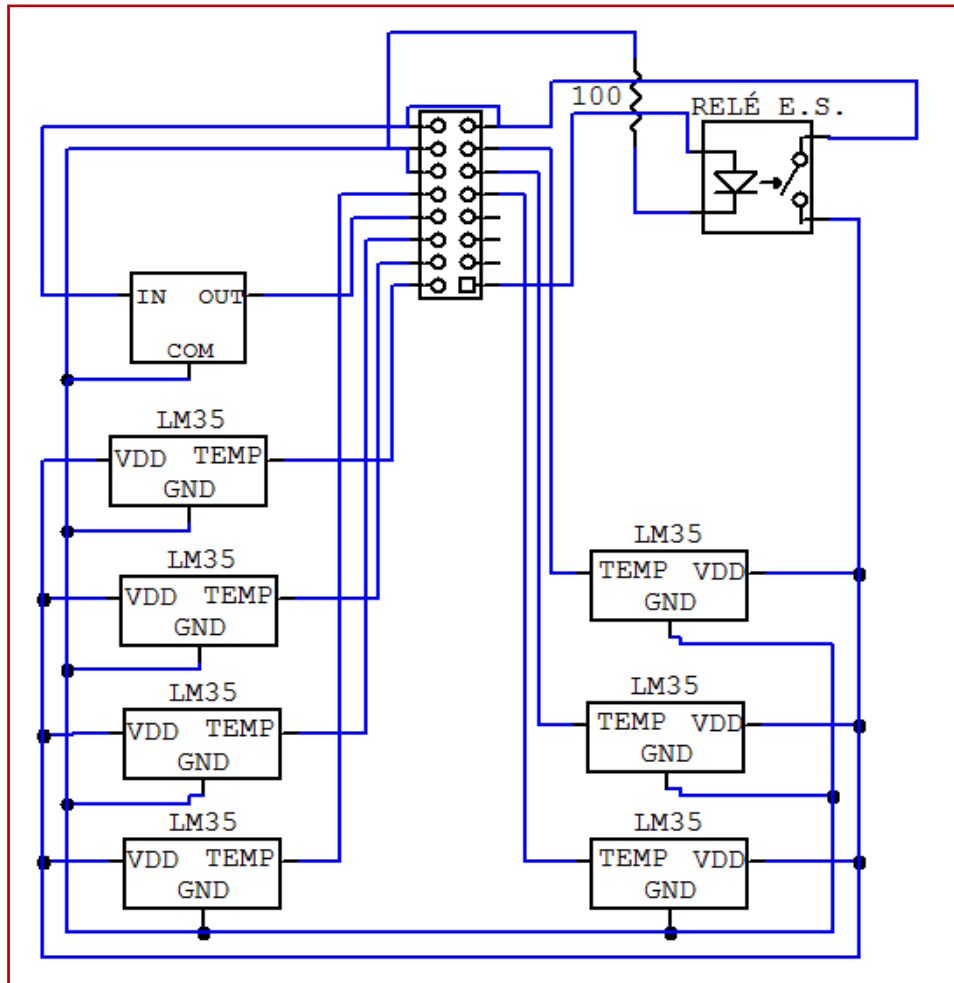
24. **Society of Robots.** “*Robot Arm Tutorial*”. [En línea]. 10 de septiembre, 2008. [http://www.societyofrobots.com/robot\\_arm\\_tutorial.shtml](http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml)
25. **Space History.** “*Word press*”. [En línea]. 12-04-1996. <http://todayinspacehistory.wordpress.com/2007/12/04/december-4-1996-first-successful-mars-rover-sojourner-was-launched-toward-mars/>.
26. **Stilson, Tim.** “*Force sensing resistors*”. [En línea]. 20 de octubre, 2008. <http://ccrma.stanford.edu/CCRMA/Courses/252/sensors/node8.html>
27. **Superrobotica y Tele-vigilancia y Seguridad Electrónica.** “*Sensor Brújula Digital CMPS03 S320160*”. [En línea]. 07 de mayo de 2008. <http://www.superrobotica.com/S320160.htm>
28. **Tech Storm Inc.** “*FSR an Overview of the technology*”. [En línea]. 20 de octubre de 2008. <http://www.techstorm.co.kr/Download/fsr-sensor.pdf>
29. **VanDoren, J.** “*Loop Tuning Fundamentals*”. Control Engineering. 01 de Julio de 2003. <http://www.controleng.com/article/CA307745.html>.  
Accesado: 2 de abril de 2008.



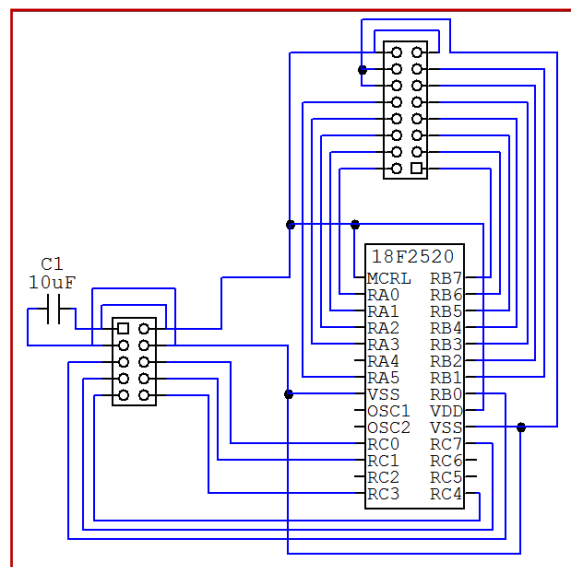
**Figura 56. Circuito de controlador de movimiento del Robot explorador.**



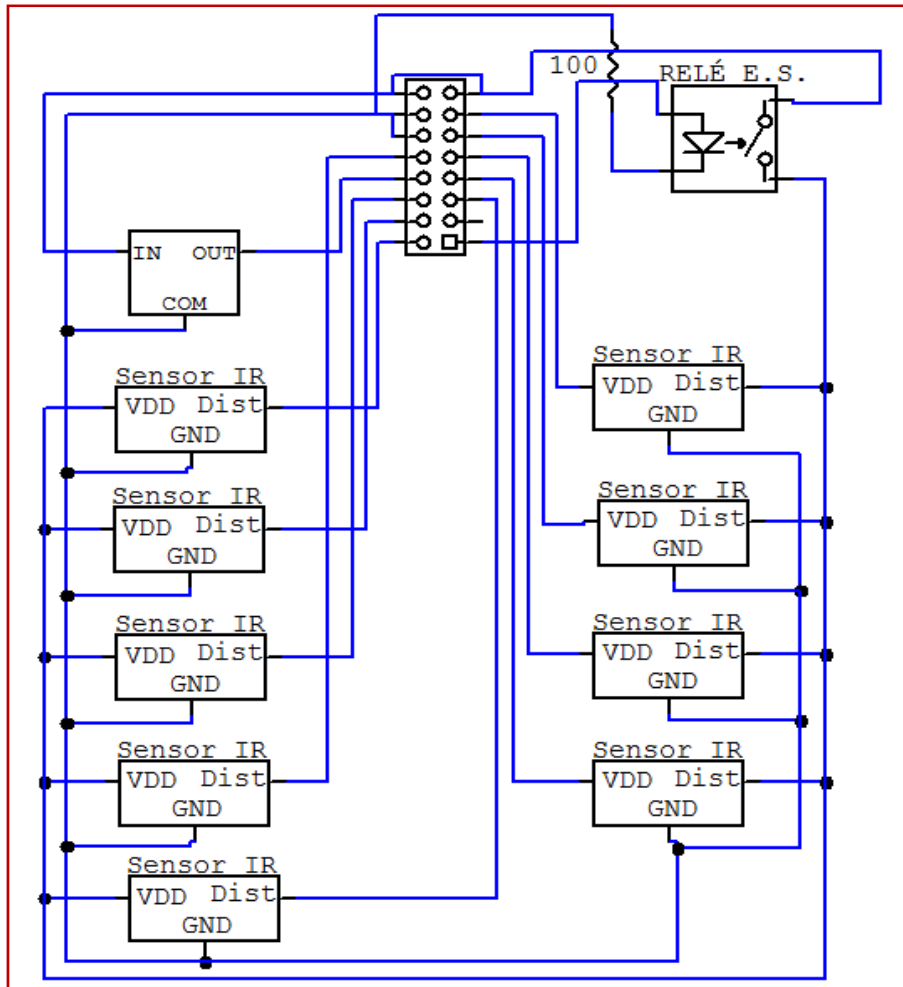
**Figura 57. Circuito de conexión de sensores de temperatura del Robot explorador.**



**Figura 58. Circuito controlador de sensores de temperatura del Robot explorador.**



**Figura 59. Circuito de conexión de sensores infrarrojos en el Robot explorador.**



**Figura 60. Circuito controlador de sensores infrarrojos del Robot explorador.**

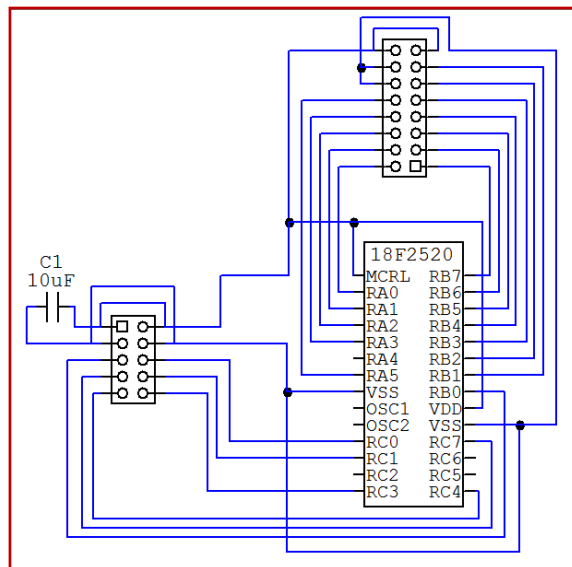
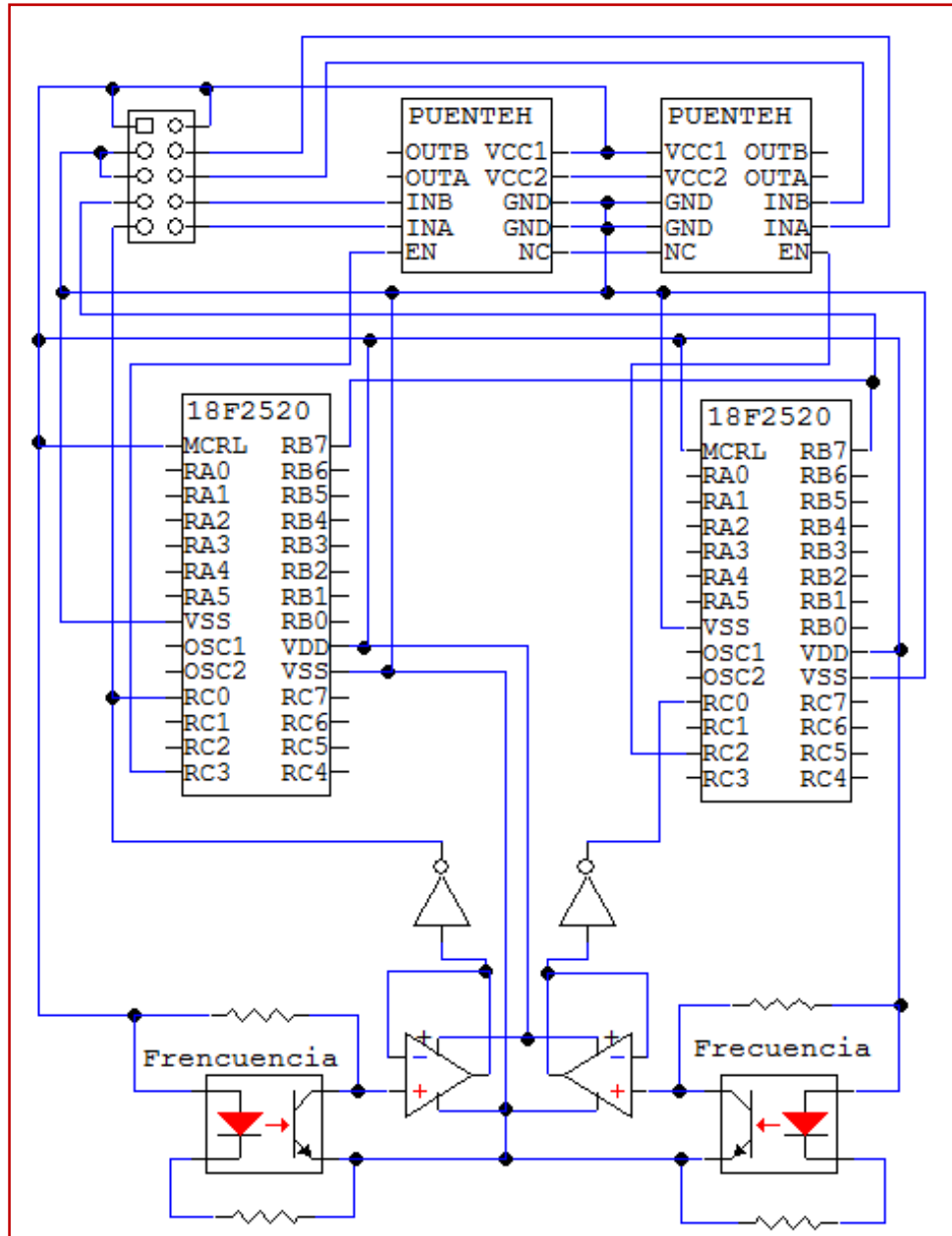


Figura 61. Circuito del sistema de control del Robot explorador.



**Figura 62. Circuito de sistema de control del brazo del Robot explorador.**

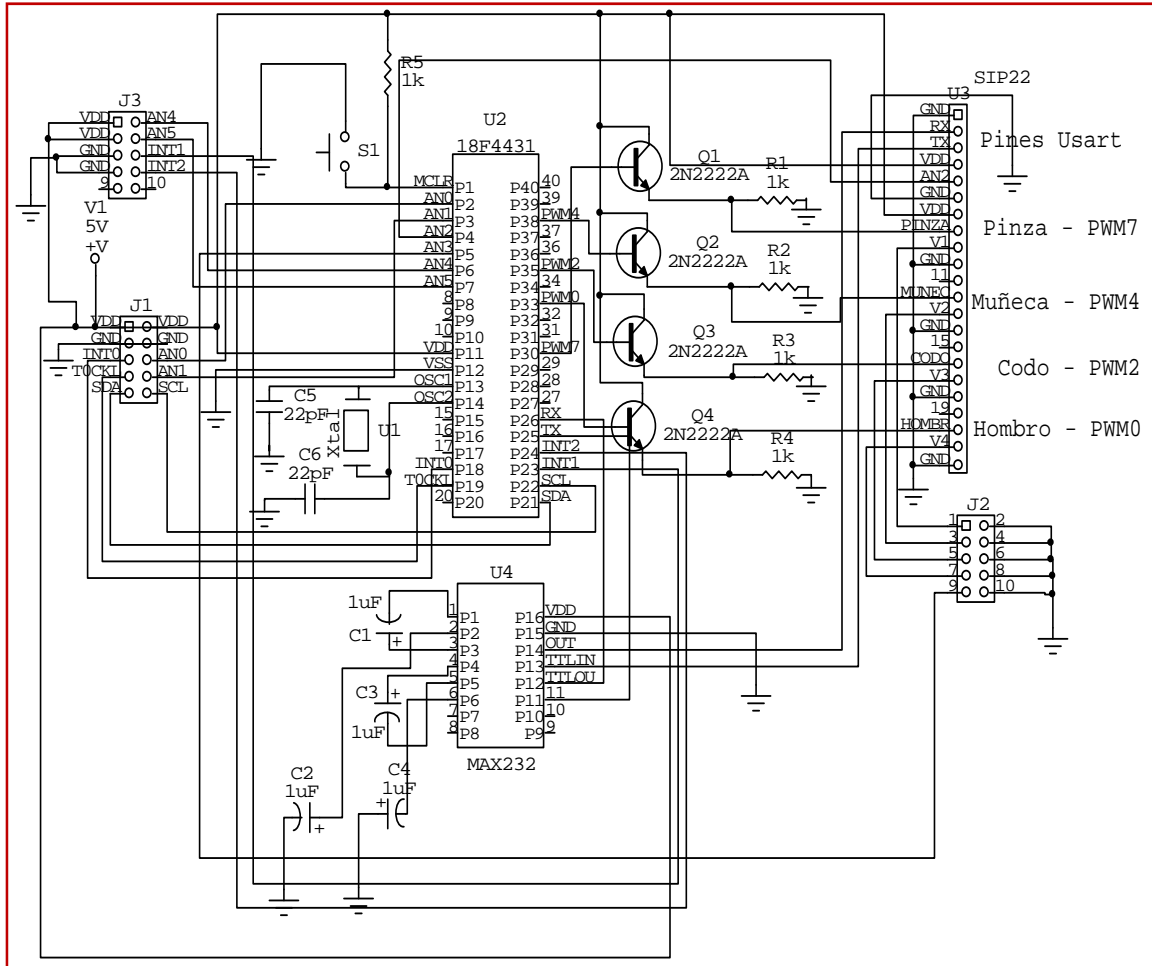
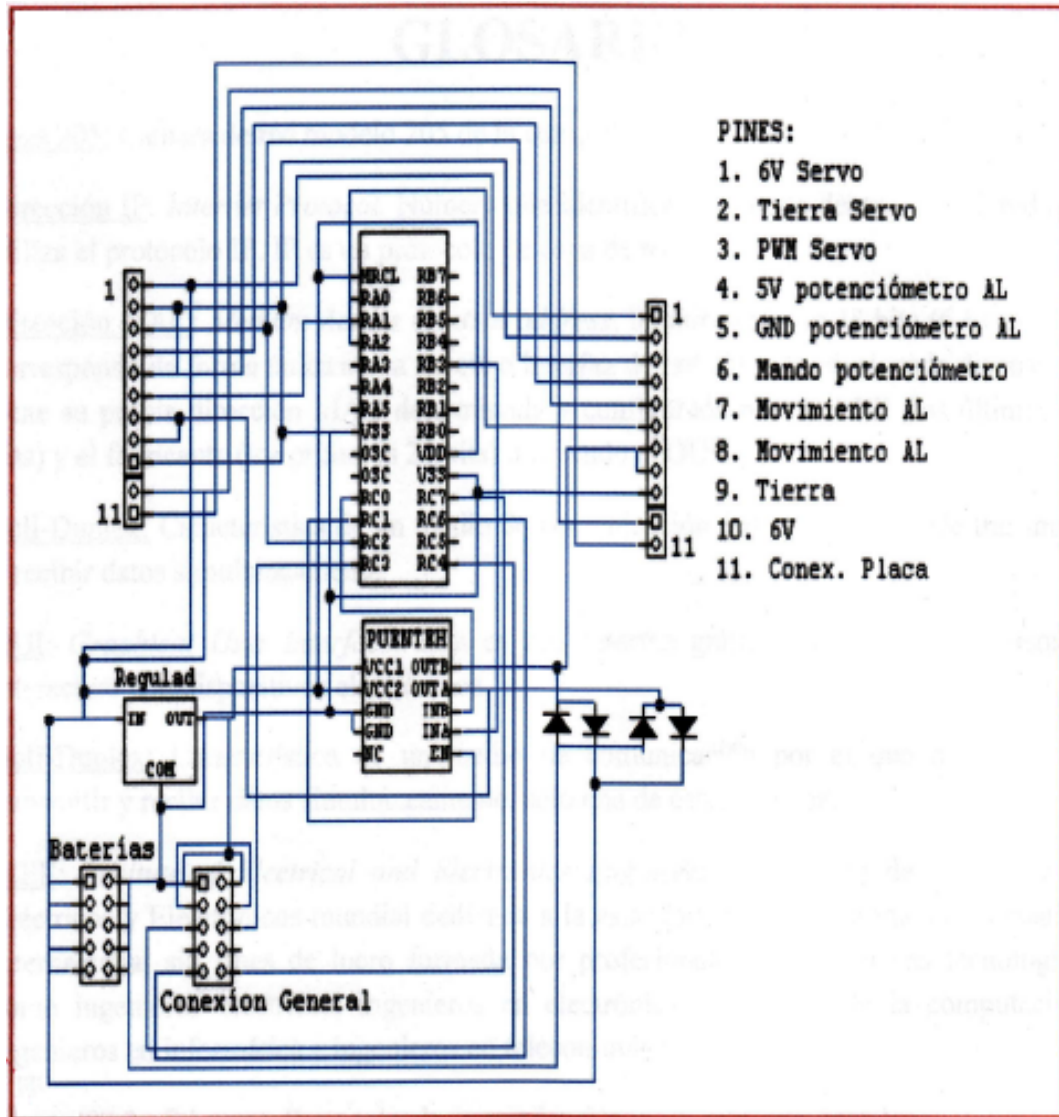


Figura 63. Circuito de sistema de control de celdas solares.



El apéndice del *módulo de visión por computadora* se incluye como un disco adjunto el cual incluye todos los códigos implementados por dicho módulo. En él se incluyen los archivos de proyecto de Visual Basic, C++, MikroC así como los archivos \*.exe y \*.hex. y la librería *rover.dll* implementada en C++.

## X. GLOSARIO

Axis 205: Cámara de red modelo 205 de la compañía Axis.

Dirección IP: *Internet Protocol*. Número que identifica a un nodo dentro de una red que utiliza el protocolo IP. IP es un protocolo de capa de red.

Dirección MAC: *Medium Access Control address*. Identificador de 48 bits (6 bytes) que corresponde de forma única a una tarjeta o interfaz de red. Es individual, cada dispositivo tiene su propia dirección MAC determinada y configurada por el IEEE (los últimos 24 bits) y el fabricante (los primeros 24 bits) utilizando el OUI.

Full-Duplex: Característica de un medio de comunicación por el que se puede transmitir y recibir datos simultáneamente.

GUI: *Graphical User Interface*. Esta es una interfaz gráfica que permite a personas interactuar con dispositivos electrónicos.

Half-Duplex: Característica de un medio de comunicación por el que no se puede transmitir y recibir datos simultáneamente, solo una de éstas a la vez.

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Asociación de profesionales Eléctricos y Electrónicos mundial dedicada a la estandarización. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros eléctricos, ingenieros en electrónica, científicos de la computación, ingenieros en informática e ingenieros en telecomunicación.

IEEE 802.3: *Ethernet*. Protocolo de comunicación para redes de área local (LAN) que define la capa física y la capa de MAC del protocolo OSI. La capa física puede ser de 3 tipos: cable coaxial, par trenzado o fibra óptica. Existen en velocidades 10Mbps, 100Mbps, 1GMbps hasta 100Gbps.

IEEE 802.11: *Wireless Ethernet*. Protocolo de comunicación para redes de área local (LAN) define la capa física y la capa MAC del protocolo OSI. En la capa física se transmite a través de ondas electromagnéticas.

LAN: *Local Area Network*. Grupo de computadoras y dispositivos que comparten un mismo canal de comunicación alambico que les permite comunicarse entre si.

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*. Institución de los Estados Unidos, que es la agencia gubernamental responsable de los programas espaciales.

PCB: *Printed Circuit Board*. Medio para sostener mecánicamente y conectar eléctricamente componentes electrónicos, a través de rutas o pistas de material conductor, grabados sobre hojas de cobre laminadas sobre un sustrato no conductor.

PIC: *Peripheral Interface Controller*. Familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc.

Router: Dispositivo de hardware que permite la interconexión de red de computadoras que opera en la capa tres (nivel de red). Este dispositivo permite asegurar el enrutamiento de paquetes entre redes o determinar la ruta óptima que debe tomar el paquete de datos.

Rover: Robot de exploración automática, parte de una misión de la NASA no tripulada enviada a explorar Marte. En este tipo de misiones se envían robots a explorar la superficie y la geología de planetas vecinos.

Sojourner: Primer *Rover* enviado a explorar Marte en 1997.

Spirit: *Rover* que aterrizó con éxito en Marte el 4 de enero de 2004.

TCP/IP: *Transmission-Control-Protocol / Internet Protocol*. Conjunto de dos protocolos que permiten la transmisión de datos entre computadoras conectadas a una red a nivel de capa de transporte y red. El protocolo TCP define la capa de transporte y el protocolo IP define la capa de red del modelo OSI. El protocolo TCP se caracteriza por ser orientado a conexión.

UDP/IP: *User Datagram Protocol / Internet Protocol*. Conjunto de dos protocolos que permiten la transmisión de datos entre computadoras conectadas a una red. El protocolo UDP define la capa de transporte y el protocolo IP define la capa de red del modelo OSI. El protocolo UDP se caracteriza por ser no orientado a conexión.

UVG: *Universidad del Valle de Guatemala*. Universidad en la ciudad de Guatemala con más de 40 años de trabajo en educación superior en Guatemala.

Visión por computadora: Disciplina que tiene como objetivo el control de sistemas y/o procesos mediante el procesamiento de imágenes digitales provistas por una cámara.

WinSock: *Windows Sockets*. Control utilizado en aplicaciones de Windows para comunicarse con otras máquinas utilizando el protocolo TCP/IP o UDP/IP.

Wi-Fi Alliance: Organización no gubernamental sin lucro formada en 1999 para certificar la interoperabilidad de dispositivos conectados en redes inalámbricas de área local (*WLAN*) que utilizan el protocolo IEEE 802.11

WLAN: *Wireless Local Area Network*. Red de comunicación que utiliza radiofrecuencia para la transmisión de datos inalámbricamente.

