DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TELE OPERADO PARA LA ASISTENCIA EN OPERACIONES DE ALTO RIESGO DEL CUERPO DE BOMBEROS

DECLARACIÓN

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Geovanny Sebastián Argudo Cobos

Adrian Danilo Arpi Saldaña

Cuenca, Julio del 2012

DECLARACIÓN

Yo Ing. Eduardo Calle, certifico haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos de la tesis titulada "Diseño y Construcción de un Robot Móvil Tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del Cuerpo de Bomberos", realizada por los señores Geovanny Sebastián Argudo Cobos y Adrian Danilo Arpi Saldaña, y por lo tanto autorizo su presentación.

Ing. Eduardo Calle

Cuenca, Julio del 2012

DEDICATORIA

Dedicatora Geovanny Sebastián Argudo Cobos

Dedico este proyecto de tesis a mis padres por ser quienes me impulsaron durante todo el trayecto de mi carrera, a mis profesores y a las autoridades de la universidad por apoyar el desarrollo de este proyecto, y a mis compañeros de tesis.

Dedicatoria Adrian Danilo Arpi Saldaña

Dedico esta obra a:

A mis padres, quienes siempre creyeron en mi, y me apoyaron en todo.

A mi compañero de Tesis, por su apoyo, paciencia y esfuerzo.

A todos mis compañeros y amigos que de alguna manera colaboraron con la realización de la Tesis.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TELE OPERADO PARA LA ASISTENCIA EN OPERACIONES DE ALTO RIESGO DEL CUERPO DE BOMBEROS

GEOVANNY SEBASTIÁN ARGUDO COBOS
Egresado de la Carrera
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca

ADRIAN DANILO ARPI SALDAÑA
Egresado de la Carrera
Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca

Dirigido por:

EDUARDO CALLE
Ingeniero Electrónico
Docente de la Universidad Politécnica Salesiana
Carrera de Ingeniería Electrónica

Cuenca - Ecuador

2012

Datos de catalogación bibliográfica

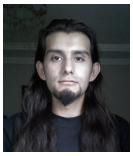
ARGUDO COBOS GEOVANNY SEBASTIÁN y ARPI SALDAÑA ADRIAN DANILO

Diseño y Construcción de un Robot Móvil Tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del Cuerpo de Bomberos

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2012

Ingeniería Electrónica

Formato: 170x240mm Páginas:



Geovanny Sebastián Argudo Cobos
Egresado de la Carrera de Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca

email: gsacware@gmail.com

Adrian Danilo Arpi Saldaña
Egresado de la Carrera de Ingeniería Electrónica
Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca

email: gsacware@gmail.com

Ing. Eduardo Calle
Ingeniero Electrónico (2001) por la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Master en Tecnologías de la Información en Fabricación (2004) y Especialista en Robótica (2004) por la Universidad Politécnica de Madrid. Especialista Universitario en Estudios Sociales de la Ciencia e Innovación Tecnológica por la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI) y de la Universidad de Oviedo. Profesor de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Unidad de Investigación en Automática de la Universidad Politécnica Salesiana.

email: ecalle@ups.edu.ec

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
© 2012 Universidad Politécnica Salesiana
CUENCA – ECUADOR – SUDAMERICA

Geovanny Sebastián Argudo Cobos, Adrian Danilo Arpi Saldaña: *Diseño y Construcción de un Robot Móvil Tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del Cuerpo de Bomberos*

IMPRESO EN ECUADOR – PRINTED IN ECUADOR

ÍNDICE GENERAL

1 ROBOTS MÓVILES DE SERVICIO 1
- 1.1 Introducción 1
- 1.2 Robótica Móvil y de Servicio 1
  - 1.2.1 Clasificación de los robots móviles 3
  - 1.2.2 Robots Móviles en la actualidad 6
- 1.3 Arquitectura de un Robot Móvil 11
  - 1.3.1 Sistema Mecánico 12
  - 1.3.2 Sistema Electrónico 13
  - 1.3.3 Fuente de Energía 13
  - 1.3.4 Métodos de Control e Inteligencia 14
  - 1.3.5 Medios de Comunicación 15
  - 1.3.6 Interfaz Humano-Máquina 15
- 1.4 Instrumentación en Robots Móviles 16
  - 1.4.1 Clasificación de los sensores 16
  - 1.4.2 Señales de los sensores 17
  - 1.4.3 Características de los sensores 18
  - 1.4.4 Variables medibles 18
  - 1.4.5 Instrumentación para percepción auditiva y visual 20
- 1.5 Métodos de determinación de posición 24
  - 1.5.1 Métodos cinemáticos (Odometría) 24
  - 1.5.2 Determinación de posición mediante sensores 26
- 1.6 Métodos de navegación 28
  - 1.6.1 Teleoperación (Telerrobótica) 28
  - 1.6.2 Métodos de Navegación basados en sensores 29
  - 1.6.3 Métodos de Navegación basados en mapas 30

2 DISEÑO DEL ROBOT MÓVIL 33
- 2.1 Introducción 33
- 2.2 Diseño Funcional y definición de los parámetros generales del robot 33
  - 2.2.1 Análisis de requerimientos del diseño 34
- 2.3 Definición de sensores, actuadores y elementos de control 36

2.3.1 Elección de Tecnologías 37
2.3.2 Elección de Dispositivos 42
2.4 Diseño del sistema de control 52
2.4.1 Arquitectura Física del Sistema de Control 53
2.4.2 Elección del Sistema Operativo 53
2.4.3 Arquitectura del Software de Control 55
2.4.4 Software de Adquisición de Datos 64
2.4.5 Software de Adquisición y Transmisión de Vídeo 66
2.5 Diseño del sistema mecánico 71
3 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT MÓVIL 75
3.1 Introducción 75
3.2 Construcción de la estructura mecánica 75
3.3 Construcción del sistema electrónico y de control 76
3.4 Ensamblaje del robot 79
3.5 Diseño de la interfaz humano-máquina 82
3.5.1 Visión remota 82
3.5.2 Palanca de control 82
3.5.3 Controles e indicadores virtuales 85
3.5.4 Administración del sistema 86
4 PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA 89
4.1 Introducción 89
4.2 Pruebas de laboratorio del robot 89
4.2.1 Pruebas de comunicación del software de control 89
4.2.2 Pruebas y calibración del controlador de velocidad de los motores 91
4.2.3 Pruebas de los sistemas de visión 92
4.3 Pruebas de campo del robot 95
4.3.1 Pruebas sobre terrenos regulares 97
4.3.2 Pruebas sobre terrenos irregulares 104
4.3.3 Pruebas de resistencia a la temperatura 107
4.4 Análisis de resultados 111
5 RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 115
A Tabulaciones resultantes de las Encuestas 123
A.1 El robot debe ser diseñado para: 123
A.2 Cual seria una velocidad optima promedio de avance del robot: 123
A.3 Cual seria el peso optimo del robot: 124

A.4 Cual seria el largo y ancho optimos del robot: 124
A.5 Cual seria la altura optima del robot: 124
A.6 Debe ser resistente a caidas directas desde: 125
A.7 Como le gustaria que sea el mando del robot (interfaz humano maquina), mediante: 125
A.8 La capacidad sensorial del robot debe hacerlo capas de: 126
A.9 Cual deberia ser la temperatura optima promedio que debe soportar el robot: 126
A.10 El robot estara expuesto a obstaculos de altura maxima de: 127
A.11 El robot debera subir y bajar pendientes como: 127
A.12 Costo que se podria pagar por este robot de ayuda, tomando en cuenta lo que se contesto anteriormente: 127
B Cuadros utilizados para la Eleccion de Tecnologias 129
B.1 Cuadro para eleccion de interfaz con el usuario 129
B.2 Cuadro para eleccion de tecnologia vision y audicion 130
B.3 Cuadro para eleccion del sistema de procesamiento 130
B.4 Cuadro para eleccion circuitos de comunicacion 131
B.5 Cuadro para eleccion actuadores y su fuente de energia 131
C Planos de las Estructuras Mecánicas de Soporte para Tarjetas Electronicas. 133
C.1 Plano Soporte Camara Estereo 133
C.2 Plano Soporte Camara Simple 134
C.3 Plano Soporte Tarjetas de Control 135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ejemplos de Robots de Servicio 2
Figura 2 Ejemplos de Robots Acuáticos *(Fuente: [28])* 3
Figura 3 Ejemplos de robots terrestres 5
Figura 4 Ejemplos de Robots Aéreos *(Fuente: [28])* 5
Figura 5 Robot Spirit de exploración a Marte *(Fuente: www.nasa.gov)* 5
Figura 6 Imágenes de iRobot Packbot *(Fuente: www.irobot.com)* 7
Figura 7 Imágenes de LUF 60 *(Fuente: www.roboserv.net)* 8
Figura 8 Imágenes VGTV-XTREME *(Fuente: roboserv.net)* 9
Figura 9 Imágenes ASENDRO EOD *(Fuente: roboserv.net)* 10
Figura 10 Imágenes de VARAN *(Fuente: www.roboserv.net)* 12
Figura 11 Arquitectura de un Robot Móvil 12
Figura 12 Nivel de integración de los sensores. *(Fuente: [32])* 18
Figura 13 Técnica casi coincidente para percepción de sonido estereofónico *(Fuente: [22])* 21
Figura 14 Variación de distancia focal *(Fuente: [3])* 22
Figura 15 Medición de un objeto mediante visión estereoscópica *(Fuente: [22])* 23
Figura 16 Dimensiones robot móvil tracción diferencial (fuente: [32]) 24
Figura 17 Posición del móvil en plano 2D (fuente: [32]) 25
Figura 18 Simulación de las respuestas de un robot móvil tracción diferencial a comandos de Velocidad Angular de las Ruedas *(Fuente: Matlab)* 27
Figura 19 Simulación de los efectos de los retardos de comunicación, en la posición y orientación de un robot móvil de tracción diferencial. *(Fuente: Matlab)* 30
Figura 20 Trayectoria asistida mediante el uso de sensores (A-C; D-E Trayectorias Autónomas) 31
Figura 21 Esquema a bloques del diseño funcional 36
Figura 22 Diagrama Electrónico de Dispositivos 42

Figura 23 Coeficientes y factores de pérdida. *(Fuente: RECOMENDACIÓN UIT-R P.1238-4)* 45
Figura 24 Distribución del Peso Pendiente 47
Figura 25 Cuadro de valores probados de los motores *(Fuente: www.npcrobotics.com)* 51
Figura 26 Arquitectura Física del Sistema de Control 54
Figura 27 Comunicación Tarjeta Principal - Computador de Usuario 58
Figura 28 Diagrama de Flujo del Hilo Comunicación 59
Figura 29 Comunicación Tarjeta Principal - Controlador de Motores 60
Figura 30 Diagrama de Flujo del Hilo RoboteQ 61
Figura 31 Comunicación Tarjeta Principal - Adquisidor de Datos 62
Figura 32 Diagrama de Flujo del Hilo Arduino 63
Figura 33 Diagrama de integración del software 65
Figura 34 Diagrama de Flujo Firmware Arduino 67
Figura 35 Diagrama de Bloques Flujo de Vídeo con OpenCV 69
Figura 36 Diagrama de Bloques Flujo de Vídeo con Gstreamer 70
Figure 37 Soportes para módulo de visión delantero 72
Figure 38 Soportes para módulo de visión trasero 73
Figure 39 Soportes para tarjetas de control 74
Figura 40 Imágenes de la carcasa del robot 76
Figura 41 Preparación para enlozado 76
Figura 42 Estructura de la rueda 77
Figura 43 Tarjeta de Sensores para módulo daq 78
Figura 44 Módulo de visión delantero 78
Figura 45 Módulo de visión trasero 79
Figura 46 Ensamblaje del módulo principal 79
Figura 47 Módulo principal de control 80
Figura 48 Posicionamiento de componentes 81
Figura 49 Cableado sección de potencia y motores 81
Figura 50 Colocación de sensor de temperatura 82
Figura 51 Esquema de conexiones 83
Figura 52 Robot móvil terminado 84
Figura 53 Visión en 2 dimensiones 84

Figura 54 Visión en 3 dimensiones 84
Figura 55 Interfaz de control 85
Figure 56 Pantalla de control técnico 87
Figura 57 Configuración solo con constante P 92
Figura 58 Configuración con constante P e I 93
Figura 59 Configuración con constante P, I y D 94
Figura 60 Prueba de accionamiento de linternas 95
Figura 61 Movilidad módulo de visión delantera 95
Figura 62 Pantalla de adquisición de datos 96
Figura 63 Prueba de subida por una rampa 97
Figura 64 Curvas de datos de pruebas en terreno plano. Velocidades y razón de giro 98
Figura 65 Curvas de datos de pruebas en terreno plano. Voltaje de batería y amperaje de motores 99
Figura 66 Curvas de datos de pruebas en una pendiente. Velocidades, razón de giro y aceleración 101
Figura 67 Curvas de datos de prueba en una pendiente. Voltaje de batería y amperaje 102
Figura 68 Trayectoria en terrenos regulares 103
Figura 69 Curvas de Datos en función del tiempo 104
Figura 70 Prueba en terreno irregular 105
Figura 71 Curvas de datos de prueba sobre terreno irregular, Velocidades y razón de giro 106
Figura 72 Curvas de datos de prueba sobre terreno irregular, Velocidades y aceleración 107
Figura 73 Curvas de datos de prueba en terreno irregular, Voltaje de batería y amperaje 108
Figura 74 Trayectoria en terrenos irregulares 109
Figura 75 Curvas de Datos en función del tiempo 110
Figura 76 Prueba con fuego 110
Figura 77 Curvas de datos de prueba de resistencia a la temperatura 111
Figura 78 Temperaturas durante prueba de resistencia 112
Figura 79 Temperaturas durante el periodo de pruebas 113
Figura 80 Niveles de voltaje durante las pruebas 114

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Características generales de los sensores 18
Cuadro 2 Sensores utilizados para medir las diferentes variables 19
Cuadro 3 Especificaciones para el diseño del robot 35
Cuadro 4 Potencias a diferentes pendientes. 48

ACRÓNIMOS

PCB Tarjeta de Circuito Impreso del ingles Printed Circuit Board

FR4 Material compuesto por lana de fibra de vidrio con una resina epoxica

CAD Diseño Asistido por Computador del ingles Computer Assisted Design

I2C Interfaz de Comunicaciones de dos hilos

SPI Interfaz de Perifericos Serial

IDE Entorno de Desarrollo Integrado

DAQ Adquisición de Datos

API Application Programming Interface

UML Unified Modeling Language

DSP Procesamiento Digital de Señales

PID Proporcional Intergral Derivativo

1 ROBOTS MÓVILES DE SERVICIO

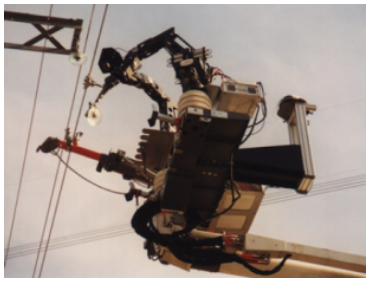
1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una introducción a la robótica móvil de servicio y todos los conceptos que esta confina. Se realiza la clasificación de los robots móviles de acuerdo a sus diferentes características y se exponen algunos ejemplos de robots móviles que existen en la actualidad. Se describe la arquitectura general de un robot móvil y se explica cada uno de sus bloques. Se realiza una revisión detallada de la instrumentación en robots móviles, donde se indica la clasificación de los sensores, el tipo de señales que entregan, las variables que miden y las características que poseen; se revisa con especial detalle la instrumentación para visión y audición haciendo énfasis en percepción en tres dimensiones. Finalmente se exponen los métodos de determinación de posición y navegación mas relevantes para los robots móviles.

1.2 ROBÓTICA MÓVIL Y DE SERVICIO

A lo largo de la historia el ser humano siempre ha tenido la necesidad de optimizar el uso de los recursos y materiales que se encuentran en su entorno y procesarlos de la manera mas segura posible, motivo por el cual se ha visto la necesidad de automatizar varias tareas mediante la invención de máquinas. Dentro de este grupo de máquinas se encuentran los robots, los cuales son creados con el propósito de servir a la humanidad en la ejecución de tareas, ya sea por si solos u operados remotamente por una persona.
Existen varios tipos de robots, todos ellos se diferencian según sus capacidades y se los puede clasificar generalmente en fijos y móviles. La robótica móvil consiste en el estudio de sistemas capaces de movimiento y acción, que se crean por la necesidad de automatizar procesos no estacionarios.[29] Los robots móviles tienen que manejarse en grandes entornos muchas veces no restringidos, por lo que al realizar sus tareas van

a enfrentarse a un alto grado de incertidumbre. Esto puede ser solventado mediante la captación de información de su entorno, la cual puede ser especialmente útil en aquellos en los que exista un riesgo potencial a la integridad de un ser humano. [29]
A diferencia de los robots estacionarios que realizan su trabajo desde un punto fijo, es decir, que no se pueden desplazar en el entorno por sus propios medios (un ejemplo de este tipo de robots se puede ver en la figura 1a), los robots móviles son capaces de desplazarse en su entorno mediante un sistema de locomoción. Llegan a ser mas versátiles en aplicaciones de campo y donde se requiera libertad de movimiento. Su grado de autonomía está íntimamente relacionado con la capacidad del robot de desenvolverse en su entorno (un ejemplo de este tipo de robots se puede ver en la figura 1b).
Los robots de servicio son creados con el objetivo de realizar trabajos destinados al servicio de la sociedad, son generalmente usados en tareas de laboratorio, ayudantes didácticos, para ayuda a minusválidos, exploración, operaciones de alto riesgo, entre otros. [25] Debido a la dificultad de las operaciones que tienen que realizar los robots de servicio pueden estar dotados con un potente sistema sensorial según su tipo de aplicación.



(a) ROBTET, Robot estático aplicado para el mantenimiento de líneas de alta tensión *(Fuente: www.robcib.etsii.upm.es)*

(b) SILO 6, Robot móvil aplicado en detección de minas *(Fuente: www.legox.com)*

Figura 1: Ejemplos de Robots de Servicio

1.2.1 *Clasificación de los robots móviles*

Según las características que los robots móviles poseen se los puede clasificar en las siguientes categorías:

De acuerdo al tipo de medio en el cual se desempeñan

- Robots Acuáticos

Generalmente se utilizan para la exploración científica. Pueden ser impulsados por diferentes métodos siendo el mas común el uso de turbinas y propulsores, otros tratan de simular los movimientos de algunos animales acuáticos con aletas o con movimientos ondulatorios tipo serpiente; unos ejemplos de estos se pueden ver en la figura 2. Entre algunas características de los robots acuáticos se destacan que pueden moverse en tres ejes o direcciones diferentes, y deben ser completamente herméticos y estar diseñados según la presión que van a soportar; la gravedad no tiene una afección significativa en este tipo de robots.

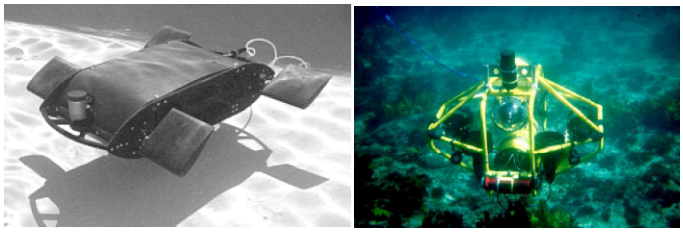


Figura 2: Ejemplos de Robots Acuáticos *(Fuente: [28])*

- Robots Terrestres

Son robots de navegación en terreno solido regular o irregular. Se pueden desplazar con diferentes tipos de sistemas de locomoción, que suele ser el que resulta mas eficiente según su aplicación. De acuerdo al mecanismo de desplazamiento pueden sub-clasificarse como:

Deslizantes.- Realizan una locomoción arrastrándose por el suelo, simulando el deslizamiento de una serpiente o gusanos. (Ver ejemplo en la figura 3a.)

Rodantes.- Su locomoción se realiza mediante ruedas, que es un sistema para desplazamiento sobre superficies homogéneas poco inclinadas. Pueden soportar una gran carga en relación a otros tipos de robots, pero tienen la desventaja de que no son eficientes en terrenos irregulares. (Ver ejemplo en la figura 3b.)

Caminantes.- Se desplazan mediante el uso de extremidades. Se los puede clasificar de acuerdo al número de patas que posean (bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc). Este tipo de robots poseen una buena adaptabilidad a cualquier tipo de terreno. (Ver ejemplo en la figura 3c.)

Rulantes.- Su movimiento es realizado por medio de orugas o cadenas, que en movilidad son menos eficientes que las ruedas pero en adaptabilidad al tipo de terreno son unas de las más eficientes. (Ver ejemplo en la figura3d.)

Otros.- Se desplazan mediante mecanismos poco comunes y novedosos. Por dar un ejemplo, existe una forma muy interesante de desplazamiento por actuadores lineales por medio de saltos.

- Robots Aéreos

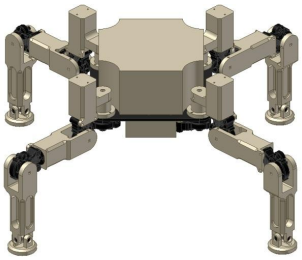
Son aquellos que tienen la capacidad de volar. Se los utiliza en gran parte para aplicaciones militares de navegación autónoma. Poseen diferentes medios para desplazarse, entre los mas importantes existen: hélices, turbinas, y para los robots de tipo zoomórfico las alas; los cuales dependerán del comportamiento del viento. Se pueden ver ejemplos de estos robots en la figura 4.

- Robots Espaciales

Son robots que navegan en el espacio exterior. Poseen diferentes medios de propulsión (iónica, combustible solido, etc), y la mayoría poseen un grupo de sondas que pueden recoger muestras y capturar imágenes. Una característica importante de este tipo de robots es que deben tener el mayor grado de autonomía posible, ya que al estar a una gran distancia de la tierra, resulta difícil realizar un control teledirigido debido a retardos de recepción y emisión de datos y señales. Un ejemplo de este tipo de robots se ve en la figura 5.

(a) Ejemplo de robot deslizante *(Fuente: www.iearobotics.com)*

(b) Ejemplo de robot rodante



(c) Ejemplo de robot caminante *(Fuente: [42])*

(d) Ejemplo de robot rulante *(Fuente: wordpress.com)*

Figura 3: Ejemplos de robots terrestres

Figura 4: Ejemplos de Robots Aéreos *(Fuente: [28])*

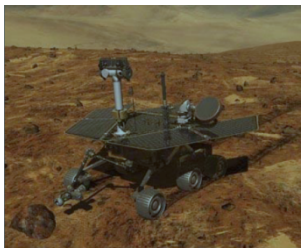


Figura 5: Robot Spirit de exploración a Marte *(Fuente: www.nasa.gov)*

De acuerdo a la dificultad del entorno en el que se desplazan

- Robots para ambientes extremos u hostiles.- Este tipo de robots suelen llevar protecciones para poder funcionar correctamente y evitar que los parámetros del ambiente dañen sus componentes internos y externos. Dentro de esta agrupación pueden estar: los robots acuáticos de exploración submarina profunda, robots manipuladores de centrales atómicas, robots exploradores en situaciones de contaminación biológica, robots asistentes en incendios y catástrofes naturales.

- Robots para ambientes normales.- Estos no están obligados a llevar protecciones ya que funcionan en ambientes con características que no llegan a afectar el funcionamiento del robot; entre los parámetros del ambiente que se consideran pueden estar: temperatura, radiación, presión atmosférica, gravedad, humedad, contaminación biológica, etc.

Según su grado de autonomía

- Robots Móviles Autónomos.- Tienen la posibilidad de tomar decisiones ante situaciones impredecibles, exentos de la presencia humana para su control.

- Robots Móviles Tele-operados.- Son aquellos en los cuales la interacción con su entorno así como la toma de decisiones es establecida por el hombre; su único inconveniente presentado es la precisión establecida entre hombre y maquina.

1.2.2 *Robots Móviles en la actualidad*

A continuación se dan a conocer algunos ejemplos de robots móviles y se describen sus principales características. El análisis se enfoca a robots móviles terrestres con sistema de locomoción rulante aplicados al servicio en operaciones de alto riesgo y emergencia; de esta forma se podrá recopilar las características mas relevantes para su aplicación en el robot objetivo de este proyecto.

iRobot Packbot

Packbot es un robot (ver figura 6) diseñado para la asistencia en operaciones militares de alto riesgo. Puede ser enviado a cualquier sitio de alto riesgo, y su misión es recopilar información de tal manera que los soldados estén al tanto de su alrededor y puedan ver y analizar objetos sospechosos. Entre sus características mas sobresalientes se encuentran las siguientes:

- Un soldado puede llevarlo fácilmente en una mochila y armarlo en tan solo unos minutos.
- Puede ser controlado desde un computador portátil mientras envía información de su posición utilizando un receptor GPS incorporado.
- Es capaz de introducirse en edificios, terrenos de tierra y dentro de cuevas oscuras; y de subir pendientes de alto grado de inclinación.
- Puede usar su brazo mecánico para manipular objetos, como una bomba.
- En caso de que packbot sea dañado sus piezas son fáciles de reponer; al contrario de una vida humana.

Figura 6: Imágenes de iRobot Packbot *(Fuente: www.irobot.com)*

LUF 60

Es un robot móvil tele-operado (ver figura 7) concebido para apoyar las labores de extinción de incendios en lugares extremadamente peligrosos y de difícil acceso para los bomberos como: aparcamientos, túneles, instalaciones subterráneas, naves industriales, fábricas, plantas químicas,

etc. Su principal característica consiste en que es capaz de propulsar un chorro de agua de gran tamaño a través de una turbina. Posee un gran tanque de reserva de agua a presión que lo puede transportar gracias a que incorpora un motor a diésel. Sus especificaciones mas relevantes son las siguientes:

- Largo: 2,3m, Ancho: 1,35m, Alto: 2 m
- Peso: 2.000 Kg
- Cañón de agua: 360 bocas, Presión agua: 15-25 bar
- Pendiente superable: 30º, Velocidad máxima: 6 km/h.
- Control remoto: hasta 300 m.
- Motor: Diesel 104 Kw, Consumo: 223 g/kwh
- Iluminación: Faros XENON: 2 x 300 w

Figura 7: Imágenes de LUF 60 *(Fuente: www.roboserv.net)*

VGTV-XTREME

Es un sistema robotizado (ver figura 8) que permite llevar a cabo tareas de inspección a distancia en lugares de difícil acceso como: zonas que se encuentran debajo de vehículos, canalizaciones, fondos de puertos y pantanos, instalaciones subterráneas, galerías, escombros, etc.; además, es capaz de operar bajo el agua hasta una profundidad de 30 metros. Principalmente se lo utiliza en aplicaciones como: búsqueda y rescate urbano, situación de rehenes, búsqueda y recuperación de objetos, inspección de espacios reducidos, inspección de conductos de calefacción,

ventilación y aire acondicionado, inspección visual remota, seguridad. Posee un sistema de locomoción rulante en forma de triángulo que le da gran versatilidad para poder sortear obstáculos, entre sus especificaciones mas relevantes se encuentran:

- Cámara a color, Cámara B/N opcional
- Velocidad: 0-4.5+m/0-15+ft/min
- Peso: 1.6kg/3.5lb
- Dimensiones: 241mm L x 190mm An x 100mm Al
- Temperatura de entorno de funcionamiento: 0° - 50° C

Figura 8: Imágenes VGTV-XTREME *(Fuente: roboserv.net)*

ASENDRO EOD

Es un robot (ver figura 9) que permite llevar a cabo tareas de reconocimiento y desactivación de explosivos a una distancia segura para los operadores. Gracias a su sistema de tracción de oruga flexible puede sortear obstáculos, subir escaleras e introducirse en medios de transporte. Entre sus características mas importantes están:

- Tele-presencia.- El movimiento del brazo manipulador puede sincronizarse con la mano o cabeza del operario. Incorpora además una cámara estéreo en el extremo del brazo, así el operario puede ver en tres dimensiones y calcular las distancias a los objetos.
- Función modular.- La sustitución de los módulos de carga por un brazo de reconocimiento o manipulador puede conseguirse en cuestión de segundos, de esta forma el operario puede reaccionar con flexibilidad ante los requisitos de la misión.

Entre sus especificaciones mas relevantes se pueden recalcar las siguientes:

- Dimensiones: Aprox. 60cm x 40cm x 40cm sin brazo
- Peso plataforma: 45kg, Peso total del robot: 75 kg
- Alimentación: 24V/27Ah baterías recargables, Autonomía: Aprox. 4 horas
- Velocidad máxima.: 10kmh
- Movilidad del sistema: superficies tanto firmes como blandas, sube escaleras y rampas de hasta un 40°, supera obstáculos con una altura de 15 a 20 cm.
- Radio de acción: Hasta 2.000 m con control remoto.
- Comunicación: Vídeo y telemetría de datos a 2,4GHz; datos de radio de alta seguridad a 433 MHz
- Cámaras de vídeo a color en el sistema: Cámaras móviles frontal y posterior; cámara estéreo en el brazo manipulador
- Iluminación: Diodos foto emisores blancos anulares de gran potencia en cada cámara.

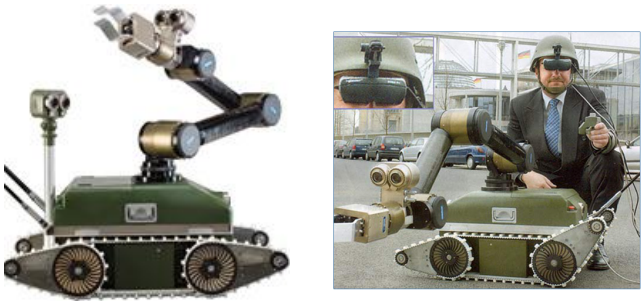


Figura 9: Imágenes ASENDRO EOD *(Fuente: roboserv.net)*

VARAN

Varan (ver figura 10) puede ser usado en exploración visual, búsqueda e identificación de artefactos explosivos. Sus especificaciones mas relevantes son las siguientes:

- Dimensiones: Largo: 1,2 m, Ancho: 0,7 m., Alto: 0,7 m.
- Peso máximo: 185 kg.
- Rango de control de velocidad: 0 - 0,5 m/s.
- Obstáculos superados con 15 kg de carga: Hasta 0,2 m
- Cuestas en la dirección de marcha: 30°.
- Declinaciones en perpendicular: 20°.
- Profundidad de agua superada: 0,1 m.
- Profundidad de nieve superada: 0,15 m.
- Grados de libertad del brazo mecánico: 6.
- Apertura máxima de las mordazas: 250 mm.
- Esfuerzo de las: 800 N – 1.000 N.
- Capacidad de carga del brazo mecánico: Hasta 50 kg
- Distancia de identificación visual: De 1 a 50 m.
- Control: Por cable: 100 m, Por radio: Hasta 1.000 m.
- Alimentación: 2 baterías de 12V. Autonomía: 4 horas.

1.3 ARQUITECTURA DE UN ROBOT MÓVIL

En la figura 11 se presenta un diagrama en el que constan los bloques característicos de un robot móvil. Se puede ver ahí que un robot puede incorporar estos bloques a manera evolutiva, y dependiendo de la aplicación del robot cada uno tendrá un cierto grado de complejidad. A continuación se detalla lo mas importante concerniente a cada bloque:

Figura 10: Imágenes de VARAN *(Fuente: www.roboserv.net)*

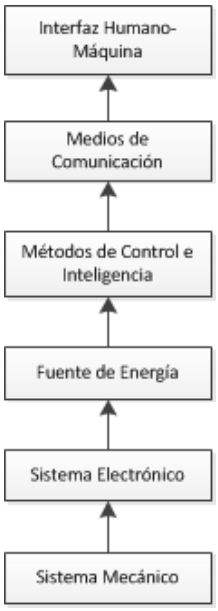


Figura 11: Arquitectura de un Robot Móvil

1.3.1 *Sistema Mecánico*

El sistema mecánico hace referencia a la estructura física del robot y a todas la partes y piezas que la conforman. Según el diseño de uno u otro robot estas partes deberán ser diseñadas de ciertas formas y dimensiones para proporcionar el sistema de locomoción más idoneo, y serán de materiales cuyas características respondan a factores tales como: resistencia, compresión, flexibilidad, impacto, corrosión; entre los mas utilizados se encuentran: metales, plásticos, compuestos, madera, etc. [31] Dentro del sistema mecánico se introduce el concepto de motricidad, que es una característica fundamental de un robot móvil, hace referencia

a la capacidad de realizar movimientos a partir del uso de actuadores mecánicos. Estos actuadores básicamente pueden ser rotativos y lineales según su modo de movimiento, y eléctricos, hidráulicos, o neumáticos según su fuente de energía. [31]

1.3.2 *Sistema Electrónico*

El sistema electrónico hace referencia a todos los tipos de circuitos eléctricos y electrónicos que deben ser implementados para el funcionamiento del robot. Existe en el mercado sistemas integrados electrónicos listos para su uso con tan solo su conexión, así como también es posible conseguir los elementos básicos para un diseño de circuitos específicos que dependen de las necesidades de cada robot; ya sean de índole analógica o digital.
Entre los tipos de circuitos más utilizados dentro de los robots se encuentran los siguientes: [35]

- Electrónica de control.- Consiste en tarjetas electrónicas capaces de realizar procesamiento; entre algunos se encuentran: microcontroladores, sistemas microprocesados, procesadores de señales digitales (Procesamiento Digital de Señales (DSP)), controladores analógicos y digitales.

- Electrónica de potencia.- Son circuitos que sirven de interfaz entre los elementos de control y los actuadores. Se encargan de proveer controladamente la potencia requerida por los actuadores; entre algunos existen: fuentes de alimentación, drivers de motores, contactores y relés.

- Electrónica de instrumentación.- Consta de todos los instrumentos o sensores que le proveen al robot, y/o al usuario, de información sobre su entorno o sobre su estado interior. [33]

1.3.3 *Fuente de Energía*

Un robot necesita una fuente de energía estable para su correcto funcionamiento. Dependiendo del tipo de componentes que posea, requerirá de algún tipo diferente de energía.

Muchas tecnologías han emergido con el afán de mejorar las características de consumo de energía para los robots, a fin de dotar de mayor autonomía a éstos. Por ello se introducen conceptos muy importantes como: la renovación de energía, que consiste en recuperar energía que se pierde durante el funcionamiento de los componentes del robot que generalmente se disipa en forma de calor; la captación de energía proveniente del entorno como: luz, calor o movimiento; y el control de consumo que hace referencia a algún método de conservación. Se puede definir también diferentes modos de funcionamiento con ciertos módulos o partes del robot deshabilitados o en modo de espera cuando no son requeridos, de esta forma se puede obtener un mayor tiempo de funcionamiento. [31]

1.3.4 *Métodos de Control e Inteligencia*

Se implementan para dar al robot una capacidad de tomar decisiones, ya sea: para seguir instrucciones del usuario, enviar información relevante al mismo, o para tener capacidades de funcionamiento autónomo.
Existen métodos de inteligencia artificial que son técnicas matemáticas y/o a base algoritmos que tratan de emular el pensamiento humano. Consisten en el análisis de señales adquiridas, para extraer información relevante de las mismas. Existen muchos métodos de inteligencia artificial, entre los más generales se encuentran las Redes Neuronales y los Algoritmos Genéticos.
Hay también métodos de localización y navegación que hacen referencia a las técnicas matemáticas, geométricas, lógicas, etc., que le permiten al robot móvil tener información sobre su posición en su entorno; y con esta poder desplazarse de forma definida, evitando obstáculos y barreras. [33]
La forma de implementar la inteligencia se puede realizar mediante la programación de software. Dependiendo de la complejidad del programa este se puede elaborar en: lenguaje máquina, lenguaje ensamblador o lenguaje de alto nivel; entre los últimos los más populares pueden ser: Java, C, C++, C#, Perl, PHP, Phyton, JavaScript, Basic, Lisp, Algol, Karel, etc. Existen también entornos que facilitan aún mas la programación, algunos ejemplos de estos son LabView y MatLab. Cabe recalcar que un concepto muy importante cuando se programa es el procesamiento en tiempo real.

1.3.5 *Medios de Comunicación*

La comunicación le permite al robot recibir y enviar información hacia el exterior, de tal forma que este puede estar en contacto ya sea con otros robots para coordinar movimientos para la realización de tareas, o principalmente con un usuario para poder recibir comandos y enviar información de su estado.
Las comunicaciones son estudiadas muy ampliamente con modelos de capas [53] [31], con muchos protocolos ya definidos para las capas superiores como: IP, TCP, UDP, FTP, HTTP, etc. Principalmente en el diseño de un robot móvil se debe tomar en muy en cuenta la capa física, que indica el medio por el que se transmitirán los datos considerando el entorno y las características de funcionamiento del robot.
Según el medio por el que se envía la información, la comunicación se puede clasificar en cableada e inalámbrica. El entorno en el que se desempeñará el robot influye mucho para el diseño de una comunicación adecuada, principalmente por la presencia de ruido eléctrico e interferencias externas, o señales ajenas que quieran intencionalmente interferir en la comunicación. Con el objetivo de transmitir información garantizando su recepción, existen métodos de modulación analógicas (como AM, FM), digitales (como ASK, FSK, PSK) y avanzados (como el ensanchamiento de espectro); además de técnicas de codificación y encriptación (como PCM, WEP, WPA, etc.) [50]

1.3.6 *Interfaz Humano-Máquina*

La interfaz humano máquina hace referencia a los mecanismos que proporcionan una comunicación entre el robot y el usuario, ya sea para controlarlo o para recibir información de este; los dispositivos se pueden clasificar como dispositivos de entrada y de salida.
En el diseño de una interfaz humano-máquina se toman en cuenta ciertos aspectos que le permitan al usuario tener una mejor experiencia al momento de interactuar con un robot, entre los conceptos más importantes se encuentran: [30]

- Estética y Ergonomía.- según la aplicación del robot se tendrá una mejor manera de controlar y recibir información, esto quiere decir que la interfaz humano-máquina debe ser diseñada de tal manera

que se acople fácilmente al usuario y que haga que este se sienta a gusto cuando controla o supervisa al robot.

- Retroalimentación.- para un mejor control, los dispositivos pueden variar su comportamiento según información que envíe el robot, es decir que el usuario sentirá cambios en los controles que le guiarán para manejar de mejor manera al robot según este sense e interprete su entorno; de esta manera se lograría tener un control fácil e intuitivo.

1.4 INSTRUMENTACIÓN EN ROBOTS MÓVILES

La instrumentación hace referencia a los dispositivos o sensores que un robot incorpora y que le sirven para poder captar información de su entorno o de su propio interior. A continuación se explica las clasificaciones, variables medibles y características de los sensores.

1.4.1 *Clasificación de los sensores*

Existen algunas maneras de clasificar a los sensores [51][35], entre las cuales tenemos las siguientes:

- Por el tipo de variable que mide:
  - Proprioceptivos.- este tipo de sensores tienen como propósito medir variables internas del robot, y dan información acerca del estado del mismo.
  - Exteroceptivos.- sirven para medir variables del entorno en que se encuentra el robot para tener conocimiento del estado del mismo.
- Por el lugar en que se encuentra:
  - Locales.- hace referencia a sensores que se encuentran montados en el robot. Se pueden subdividir entre los que se encuentran dentro y los que necesitan tener salida al exterior del robot.

  - Globales.- sensores que no se encuentran montados en el robot sino que están en su entorno transmitiendo la información hacia el robot.

- Por su modo de funcionamiento:
  - Pasivos.- sensores que solo se encargan de recibir información del entorno sin alterar al mismo.
  - Activos.- estos funcionan estimulando al entorno enviando algún tipo de señal, y miden como esta es afectada al regresar.

1.4.2 *Señales de los sensores*

Los sensores entregan la información de las variables medidas mediante señales eléctricas que pueden ser interpretadas mediante circuitos electrónicos. Entre los tipos de señales más comunes se encuentran: señal binaria o de dos estados encendido y apagado, señal de tiempo o frecuencia como PWM, señal analógica, y señal digital con valores binarios que pueden ser transmitidos en forma paralela o serial. [35]
De acuerdo a sus características de entrega de información, los sensores pueden ser más o menos complejos por su nivel de integración [32], de acuerdo a esto existen los siguientes tipos de sensores: (comparados también en la figura 12)

- Básico.- este sensor únicamente se encarga de realizar la transformación de las variables físicas a una señal eléctrica.
- Integrado.- a más de realizar la transformación básica, este sensor procesa la señal eléctrica para dar información más manejable; puede realizar amplificación, filtrado, linearización, normalización y conversión a datos digitales.
- Inteligente.- mediante más procesamiento de la señal, con análisis y evaluación de la misma, este sensor puede entregar datos más específicos y relevantes para el usuario.

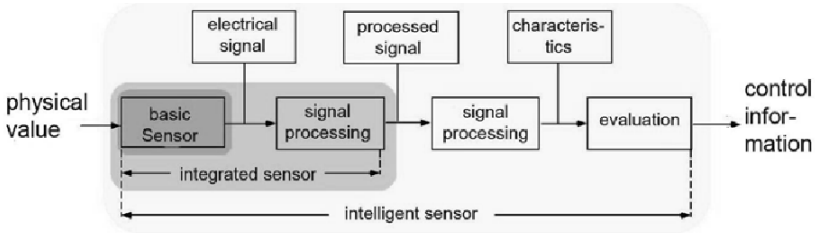


Figura 12: Nivel de integración de los sensores. *(Fuente: [32])*

1.4.3 *Características de los sensores*

Las características de los sensores son muy importantes para realizar el diseño de un robot, estas deben ser tomadas en cuenta para dimensionar los dispositivos sensoriales de acuerdo a las variables que el robot debe medir, y de acuerdo a como estos deben incorporarse al sistema. Además al tomar en cuenta características tales como error, sensibilidad, exactitud, es posible implementar algoritmos de control muy precisos [35]. En el cuadro 1 se realiza un resumen de las características generales de los sensores.

Caract. físicas	Caract. de laboratorio	Caract. en el entorno
Dimensiones	Rango	Sensibilidad
Peso	Rango dinámico	Sensibilidad cruzada
Alimentación	Resolución	Error sistemático
Consumo	Linealidad	Error aleatorio
Resistencia a impacto	Ancho de banda	Exactitud
Costo		Precisión

Cuadro 1: Características generales de los sensores

1.4.4 *Variables medibles*

Para que un robot pueda percibir su entorno y transmitir esa información hacia el usuario debe cuantificar las muchas variables físicas a las que se enfrenta. Existe mucha información que podría ser percibida y por lo mismo existe mucha variedad de sensores disponibles para esto, cada uno

con sus ventajas y desventajas. Por lo que queda en la responsabilidad del diseñador el elegir los mas correctos de acuerdo a las características y señales de cada dispositivo revisados en los puntos anteriores. En el cuadro 2 se listan los sensores más útiles para aplicaciones en robótica móvil. [51]

Variable	Sensores
Tacto	Interruptor de contacto Detector de Colisión Fin de Carrera Barrera óptica Sensor de proximidad
Fuerza	Sensor de fuerza lineal Sensor de fuerza rotativa
Movimiento y Velocidad	Encoder Acelerómetro Sensor de razón de giro
Posición relativa al entorno	GPS Compás Encoder Acelerómetros y Sensores de razón de giro
Orientación	Giroscopio Inclinómetro Potenciómetro Resolver
Distancia	Sensor por ultrasonido Sensor por infrarrojo Sensor por láser Radar doler

Cuadro 2: Sensores utilizados para medir las diferentes variables

1.4.5 *Instrumentación para percepción auditiva y visual*

La capacidad de un robot para captar información sonora y visual y enviarla hacia el usuario es de gran importancia principalmente cuando el robot es operado remotamente. El objetivo es proporcionar al operador toda la información requerida para que este pueda sentir el entorno como si estuviera en el lugar que se encuentra el robot; esto es conocido como tele-presencia. De tal forma que al usuario se le facilite controlar al robot y pueda realizar las tareas correctamente y sin la necesidad de periodos largos de entrenamiento previo. [30] Pueden existir varios niveles de percepción según la cantidad, calidad y tipos de dispositivos que puede incorporar un robot, y las técnicas de procesar la información que estos captan. A continuación se detalla la instrumentación necesaria para la percepción auditiva y visual.

Percepción auditiva

El dispositivo utilizado para captar sonidos es el micrófono, cuyo propósito es transformar señales de audio en señales eléctricas que pueden ser procesadas. Los micrófonos tienen algunas características que determinan su desempeño, entre las cuales se encuentran la directividad y la impedancia. Existen varios tipos de micrófonos según su principio de funcionamiento:

- Dinámico (electromagnético)
- Condensador (electroestático)
- Electret:
- Carbón
- Piezoeléctrico
- Fibra óptica
- MEMS

Con el objetivo de aumentar la capacidad de percepción se introduce el concepto de sonido estereofónico, que hace referencia a escuchar o reproducir sonido a través de dos micrófonos o parlantes, de tal forma que se pueda percibir la dirección de la cual proviene; se lo puede definir como sonido 3D. Para poder lograr este efecto se debe tomar en cuenta parámetros como tiempo de llegada, intensidad y claridad del sonido en cada micrófono. Al analizar y combinar estos tres factores se puede determinar información como el lugar de procedencia o la distancia de la fuente de sonido. Dependiendo de cómo se coloquen

los micrófonos se podrá capturar de mejor manera cada una de las características mencionadas con el fin de tener mas exactitud en las mediciones. Existen principalmente cuatro técnicas para la captación de sonido estereo: técnica A-B, técnica X-Y, técnica casi coincidente (ver figura 13), técnica binaural; aplicar una u otra técnica dependerá de la posibilidad de posicionamiento físico de los micrófonos dentro del robot.

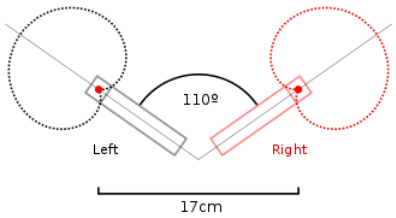


Figura 13: Técnica casi coincidente para percepción de sonido estereofónico *(Fuente: [22])*

Percepción visual

El dispositivo utilizado para captar imágenes y vídeo es la cámara, que se encarga de transformar la luz hacia señales eléctricas. Poseen sensores que consisten en matrices de captadores de fotones que durante un tiempo dado los acumulan, según cuantos fotones hay se puede percibir la intensidad de cada píxel para crear una imagen. Si se repite este proceso en intervalos determinados se llega a producir vídeo; la velocidad a la que se repite se llama también velocidad de obturación. Existen dos principales tipos de sensores que hoy en día son utilizados:

- Sensor CCD (Charged Coupled Device).- se basan en el efecto fotovoltaico, cada píxel de la matriz se lo puede ver como una capacitancia muy pequeña que es sensible a la luz.
- Sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).- constan de igual manera de una matriz de píxeles pero cada uno con un transistor y una circuitería individual.

Para poder captar imágenes a colores se utilizan filtros de luz para captar separadamente fotones correspondientes a los colores básicos: rojo, verde y azul. Se suelen hacer arreglos de 2x2 píxeles siendo estos generalmente

2 verdes, 1 rojo y 1 azul, o también se suele utilizar 3 matrices separadas cada una con su filtro correspondiente.
Es necesaria una lente para concentrar la luz del entorno sobre el sensor. Dependiendo de las dimensiones de la lente, como la distancia focal y la apertura, se pueden variar características como la perspectiva, el acercamiento, el ángulo de visión, el enfoque, etc. En la figura 14 se puede ver cómo varía el ángulo de visión y por ende la perspectiva según la distancia focal.

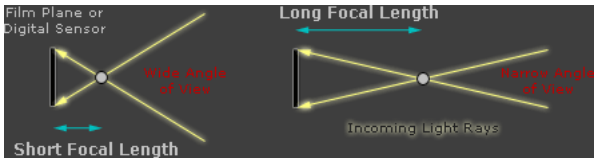
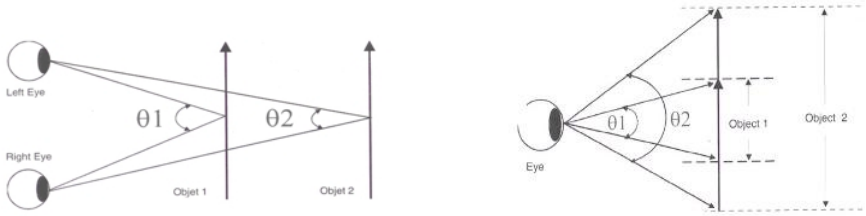


Figura 14: Variación de distancia focal *(Fuente: [3])*

Una cámara requiere de un rango de intensidad de luz para un funcionamiento adecuado. Cuando la luz es demasiado intensa se produce una saturación del sensor lo que aparentaría una imagen completamente blanca, en cambio cuando la luz es demasiado baja no se lograría captarla lo que resultaría en una imagen totalmente negra. Lo primero se puede solucionar variando la sensibilidad y el tiempo de captura, y para lo segundo existen tecnologías de visión nocturna que funcionan ya sea con la captación de radiaciones debido al calor de los cuerpos o la captación de de rayos casi infrarrojos rebotantes que son emitidos desde la propia cámara.
Con el objetivo de aumentar la capacidad de percepción se introduce el concepto de visión estereoscópica, que hace referencia a la captación simultánea de la misma imagen por dos cámaras separadas a una cierta distancia. Este concepto es inspirado por la visión humana, por lo general los ojos de una persona están separados alrededor de 45mm hasta los 75mm con un promedio de 65mm; lo que se conoce como disparidad retinal. Usando esto se puede medir el tamaño de los objetos y la distancia a la que se encuentran mediante la medición del ángulo de visión hacia los ojos como se puede ver en la figura 15.
El efecto 3d se logra por las diferencias entre las imágenes que capta cada ojo debido a su separación, a esto se lo conoce como Paralaje, que es la distancia que se mueven los objetos al ser vistos por el ojo izquierdo y



(a) Medición de distancia al objeto. (b) Medición de tamaño del objeto

Figura 15: Medición de un objeto mediante visión estereoscópica *(Fuente: [22])*

luego por el ojo derecho. Según su magnitud existen los siguientes tipos de paralaje: [37]

- Paralaje Cero: Cuando las dos imágenes están exactamente una encima de la otra, el efecto 3d se pierde y se ve como una proyección de un monitor.
- Paralaje Positivo: Cuando la separación de las imágenes es menor o igual a la separación de los ojos, siendo esta el punto máximo que se puede dar cuando se ve una imagen muy lejana; como si se viera al infinito.
- Paralaje Negativo: Cuando la separación de las imágenes es negativa.
- Paralaje Divergente: Cuando la separación de las imágenes es mayor a la distancia entre los ojos; no existe razón para utilizar esto y además produce molestias.

Para poder ver una imagen estereoscópica es necesario que cada ojo vea solamente la imagen que le corresponde, para esto existen algunos métodos desde la visión libre paralela o cruzada que consisten en la manipulación de la línea de vista de los ojos, hasta dispositivos avanzados de alta tecnología como gafas anáglifas, gafas polarizadas, gafas LCD, o equipos HDM (Head Mounted Display).

1.5 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE POSICIÓN

1.5.1 *Métodos cinemáticos (Odometría)*

Consiste en el uso de las ecuaciones que rigen la cinemática de un robot móvil para determinar la posición de este en el entorno en que se mueve, el cual tiene como referencia un sistema de coordenadas (*x*,*y*,*z*). La posición se calcula a partir de los cambios que se den en los sistemas de locomoción del robot. En la estimación de la posición se asume que las ruedas o patas no tienen deslizamiento alguno, de esta manera se asume que el movimiento de las extremidades o llantas del robot se convierten totalmente en un movimiento de translación y/o rotación del robot móvil.
Mas específicamente, para el análisis cinemático de un robot móvil de tracción diferencial se tiene en cuenta las dimensiones: L que es la longitud entre las dos llantas del vehículo, r es el radio de las ruedas, y *H* que es el ancho total del robot; como se ve puede ver en la figura 16.

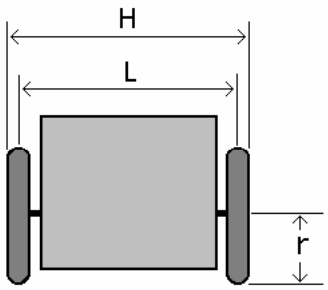


Figura 16: Dimensiones robot móvil tracción diferencial (fuente: [32])

Para el modelo se supone que su desplazamiento es en dos dimensiones, en la figura 17 se muestra la localización del robot en el punto (*x*,*y*), donde v es la velocidad lineal del móvil y, *Vl* y *Vr* la velocidad tangencial de cada un de las ruedas.
Para determinar la posición se puede utilizar algunos métodos como son las matrices de rotación y translación [32][30][49][35][41][40] y el método geométrico cinemático [32] que analiza la configuración geométrica junto con cada una de las velocidades que intervienen en el problema utilizando los metodos de mecánica clásica.

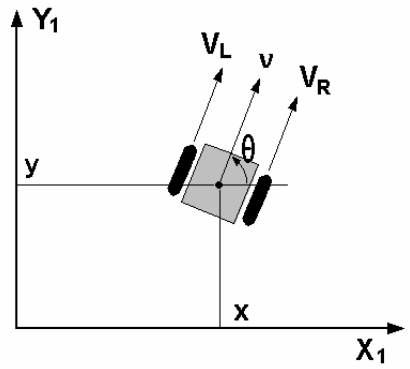


Figura 17: Posición del móvil en plano 2D (fuente: [32])

De acuerdo con Aníbal Ollero [30] y otros [40], se puede obtener el modelo matematico para determinar la posición de un móvil de tracción diferencial (ver figura 17) a partir de las velocidades *Vl* y *Vr*, las cuales se obtienen con la ecuación 1.1.

$$Vl = w_l \cdot r;\ Vr = w_r \cdot r \tag{1.1}$$

En donde w_l y w_r son las velocidades angulares de cada rueda. Las velocidades lineales y angulares del robot se obtienen con la ecuación 1.2 y 1.3, respectivamente.

$$v = \frac{Vr + Vl}{2} = \frac{(w_l + w_r) \cdot r}{2} \tag{1.2}$$

$$w = \frac{Vr - Vl}{L} = \frac{(w_r - w_l) \cdot r}{L} \tag{1.3}$$

Conociendo que el robot se mueve en una superficie plana, con rodadura pura (sin deslizamiento) y que los ejes de las ruedas (de guiado) son perpendiculares a la superficie plana, se puede demostrar que si $p = \begin{bmatrix} x & y & \theta \end{bmatrix}$ es el vector de coordenadas del punto guía del robot y la orientación del mismo y si $q\prime = \begin{bmatrix} v & w \end{bmatrix}$ es el vector de la velocidad lineal y angular del móvil, se puede escribir la ecuación 1.4

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -sen(\theta) & 0 \\ \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \tag{1.4}$$

Ahora sustituyendo 1.2 y 1.3 en la ecuación 1.4 se obtiene la ecuación 1.5

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \cdot sen(\theta)/2 & -r \cdot sen(\theta)/2 \\ r \cdot cos(\theta)/2 & r \cdot cos(\theta)/2 \\ -r/L & r/L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_l \\ w_r \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

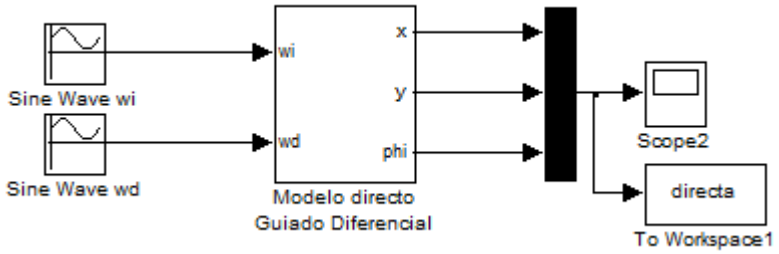
Una herramienta muy útil para realizar estos cálculos es MATLAB a través de Simulink y la librería HEMERO[1] que es de uso libre. Utilizando esta herramienta (ver figura 18) se puede determinar la localización del centro geométrico de un robot móvil de tracción diferencial en función del tiempo y de las velocidades angulares de cada una de las ruedas.

1.5.2 *Determinación de posición mediante sensores*

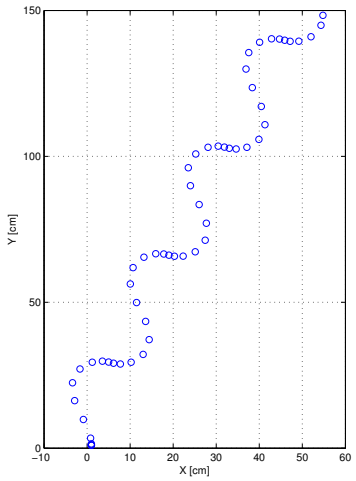
Triangulación de frecuencias

Para estimar la posición de un robot móvil considerando el deslizamiento de las patas o ruedas es necesario el uso de referencias fijas en un plano de acción. Para lo cual se tiene estaciones bases que transmiten una frecuencia hacia el móvil, el cual la retransmite. Teniendo a consideración variaciones en las señales tales como desfasamiento y variación de frecuencia en función del lugar en donde se encuentre el robot, da lugar a la posibilidad de determinar la distancia entre las estaciones fijas y móviles que son necesarias para el cálculo de la posición; como mínimo debe haber tres estaciones fijas para que esto pueda ser factible. Las señales emitidas pueden ser ondas de radio, ultrasonido y ondas de luz dependiendo de la aplicación y del ambiente en el cual se desenvuelve el robot. [45]
El problema que tiene la triangulación es la necesidad de estaciones base, haciendo que el robot quede destinado a funcionar solamente en superficies que estén cubierta por estas estaciones. Además, si se pierden las señales no se puede determinar la posición por lo que las estaciones base deben ser redundantes, es decir se deben implementar estaciones base auxiliares para hacer más robusto el sistema. [54]

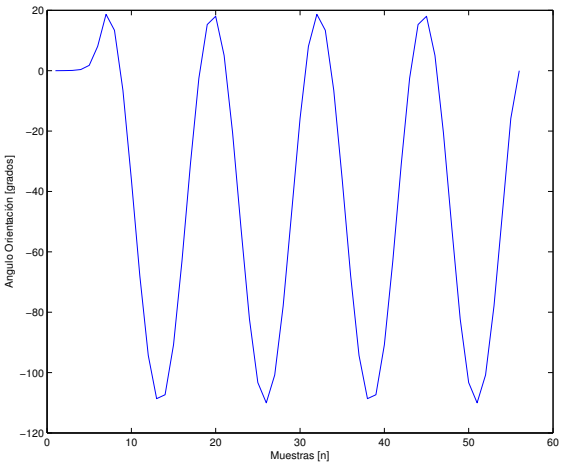
1 Librería Hemero para Simulink, disponible en la página web http://grvc.us.es/hemero/descargar.html



(a) Diagrama en Simulink con Librería HEMERO



(b) Posición del Robot Móvil



(c) Orientación del Robot Móvil

Figura 18: Simulación de las respuestas de un robot móvil tracción diferencial a comandos de Velocidad Angular de las Ruedas *(Fuente: Matlab)*

Visión Artificial

La visión artificial es uno de los campos en los cuales a incursionado la robótica, en respuesta al problema de determinar la posición de un robot en el medio en el cual está funcionando. Obteniendo una posición relativa frente a obstáculos y/o vías para poder predecir los lugares por los cuales el robot se puede desplazar sin colisiones.

Óptica y Ultrasonido

En la robótica la visión artificial no solo implica el uso de cámaras en el espectro de visible sino que además implica el uso de cámaras infrarrojas y sistemas de ultrasonido, por el hecho de que gran parte de la robótica móvil se aplica en lugares de difícil acceso para el ser humano y donde no hay condiciones adecuadas de luz para el uso de cámaras habituales. [45] [47]

GPS

Un medio de localización (por triangulación) de un objeto en todo el planeta tierra y con una precisión en el rango de los metros. Puede darnos una referencia absoluta de la posición de un robot móvil que se encuentre en el planeta tierra, para esto se hace uso de los satélites como estaciones base. Existen varios satélites dedicados a esta aplicación, el inconveniente aquí son los costos ya que mientras más precisión se requiere más costosos son los equipos. Además, también tiene el inconveniente de que no se puede usar en interiores donde las señales de los satélites son débiles. [32], [45]

Técnicas Modernas

Existen técnicas modernas de localización referencial a obstáculos y vías como es el caso de los haces de luz láser que pueden dar información muy precisa de la localización de un vehículo con respecto a un obstáculo; pero el inconveniente es que estos sistemas son muy costosos. [32]

1.6 MÉTODOS DE NAVEGACIÓN

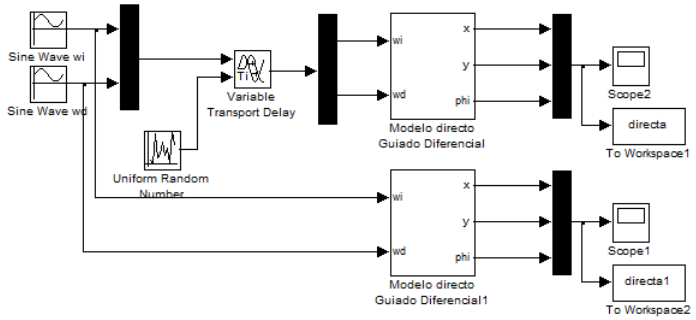
1.6.1 *Teleoperación (Telerrobótica)*

Es un término que se introduce con la robótica móvil para referirse a la navegación y operación de los robots móviles con asistencia de la inteligencia humana; "La telerrobótica surge como síntesis de la teleoperación y la robótica". [30][40] La teleoperación consiste en que el usuario pueda recibir información desde el robot y pueda generar órdenes para que este las ejecute automáticamente. Permite una intervención mucho

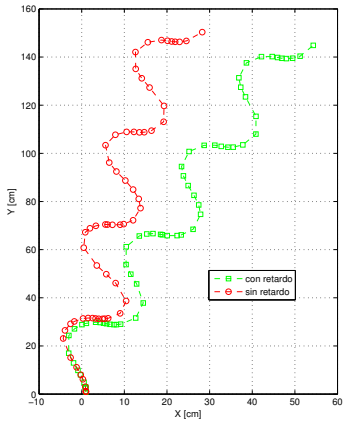
más eficiente de los operadores ya que disminuye notablemente los efectos problemáticos de los retardos. Este concepto se puede aplicar en todos los campos como: la exploración planetaria, la cirugía, intervenciones en el fondo del océano, o en cualquier sitio que sea peligroso para los humanos. [30][40]
Existen varias arquitecturas de teleoperación y telerobotica entre ellas: Arquitectura AJA, NASREM (NASA), Teleprogramación basada en comportamientos, UTAP (NASA), AuRA y SSC las cuales se caracterizan por estar diseñadas para un tipo de robot especifico, sean manipuladores, móviles o de propósito general, además de la forma de análisis de como influye el retardo de la comunicación, y características de control teleoperado directo o control supervisor [40].
Entre los que se puede destacar al Proyecto de Arquitectura Abierta Unificada Telerrobótica UTAP que busca la estandarización de componentes, que permita la modularización de hardware y software estándar, haciendo posible la construcción y reuso de módulos de software y hardware en diversas aplicaciones, facilitando de esta forma, la capacitación, reducción de costos de producción y mantenimiento, además de proporcionar la posibilidad de tener operadares mas diestros y fiables, ya que conocen la arquitectura en que se basa el robot [40], [43].
Para complementar la simulación presentada en la figura 18 se presenta en la figura 19 un modelo básico de teleoperación para un robot móvil de tracción diferencial , realizado en Simulink, los archivos correspondientes a las simulaciones están disponibles en el CD que acompaña a esta monografía.

1.6.2 *Métodos de Navegación basados en sensores*

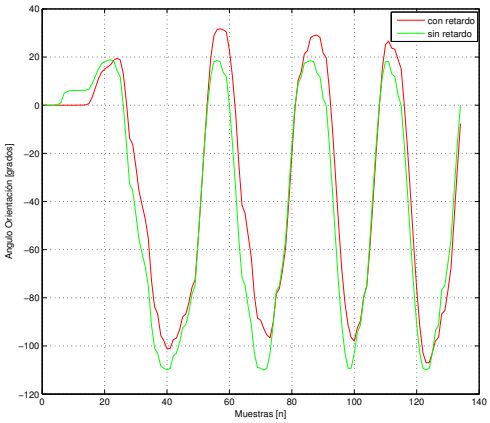
Utiliza la información que los sensores externos del robot móvil captan de su entorno para determinar una ruta por la cual el robot puede alcanzar su objetivo, de manera que no se presenten colisiones con los obstáculos del medio. Es muy utilizado en robots autómatas, aunque también se usa en robots tele-operados para asistencia a personas. De acuerdo con esto el robot sigue la trayectoria que ha identificado como objetivo del usuario haciendo mucho más fácil la maniobrabilidad del robot, un esquema de esto se puede ver en la figura 20. [36]



(a) Diagrama en Simulink con Librería HEMERO



(b) Posición del Robot Móvil



(c) Orientación del Robot Móvil

Figura 19: Simulación de los efectos de los retardos de comunicación, en la posición y orientación de un robot móvil de tracción diferencial. *(Fuente: Matlab)*

1.6.3 *Métodos de Navegación basados en mapas*

Existen varios métodos de navegación basados en mapas, los cuales utilizan métodos probabilísticos para construir un mapa del entorno que les rodea. Con esto la autonomía del robot es cada vez más eficiente, es decir, si repite una trayectoria de la cual ya tiene conocimiento es mucho más versátil en el recorrido de la misma. Estos métodos son muy complicados y requieren de procesadores muy rápidos para la estimación

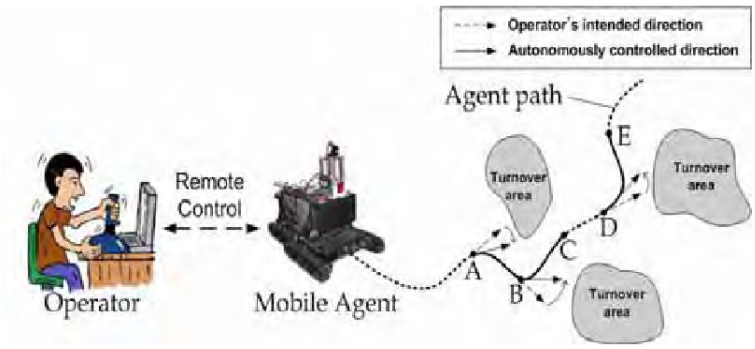


Figura 20: Trayectoria asistida mediante el uso de sensores (A-C; D-E Trayectorias Autónomas)

de una trayectoria, a pesar de esto, debido a la exactitud que proporcionan son ampliamente utilizados en robots móviles completamente autónomos. [49][32] [35][41]

2 DISEÑO DEL ROBOT MÓVIL

2.1 INTRODUCCIÓN

El diseño del robot parte de un diagrama funcional en el que se establecen los requisitos fundamentales del sistema. En este capítulo se definen los parámetros de diseño basándose en características de la aplicación como el medio en el que se va a desempeñar y la labor que va a realizar. Para este proyecto se han realizado encuestas al personal del Cuerpo de Bomberos de Cuenca para obtener una referencia de que es lo que debería ser capaz de hacer el robot y poder cuantificar sus características y especificaciones. Posteriormente se eligen los tipos de tecnologías que permiten cumplir con los parámetros establecidos, ya sea en cuestión de materiales, formas de locomoción, dispositivos de control o interfaz humano máquina. Se escogen las partes que mejor cumplan con su función y que mejor se integren dentro de todo el sistema. Por último se realiza el diseño del sistema mecánico que indica donde y cómo deben ser armadas las piezas; el sistema electrónico que indica las conexiones entre los dispositivos de control; y finalmente el diseño del sistema de control e inteligencia el cual es implementado en software.

2.2 DISEÑO FUNCIONAL Y DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS GENERALES DEL ROBOT

En este capítulo se definen los parámetros y características que debe cumplir el robot, basándose en el criterio de los diseñadores y los resultados de las encuestas realizadas, cuyas tabulaciones se pueden ver en el anexo A. Con esto se procede a realizar el diseño funcional del sistema que permite tener la visión general para poder escoger los equipos mas adelante.

2.2.1 *Análisis de requerimientos del diseño*

El robot principalmente será usado para exploración de incendios en industrias donde debe manejar materiales peligrosos. Su principal tarea debe ser la recopilación de información sobre la temperatura del entorno, por lo cual debe llevar los dispositivos sensoriales que le permitan realizar esta tarea; además debe poder detectar a víctimas en necesidad de auxilio.
El robot debe proveer al usuario tele-presencia, es decir, la capacidad de analizar diferentes entornos de forma remota mediante el envío de información visual y auditiva, y la recepción de comandos para su control.
La interfaz óptima para su manejo, que haga sentir cómodo al usuario, puede ser el uso de palancas o como alternativa el uso de herramientas mas intuitivas que proporcionen una mejor experiencia.
En cuanto a sus dimensiones, deben encontrarse entre 0.5m a 0.75m de ancho y de 0.75m a 1m de largo, así el robot podrá ser capaz de sortear obstáculos del terreno y a su vez podrá pasar a través por corredores y puertas. Con una altura óptima de 40cm, de tal forma que el robot pueda albergar en su interior los dispositivos necesarios. Se prefiere que el peso del robot se encuentre en un término medio entre 30Kg y 50Kg, de tal forma que pueda resistir abuso físico pero que pueda ser transportado y manejado con relativa facilidad.
La preferencia de la velocidad óptima del robot debe ser entre la de una persona caminando y la de una trotando, haciendo que el robot no resulte muy difícil de manejar pero con una buena velocidad de respuesta. El robot debería poder desplazarse por pendientes entre 40° y 70°, esto debido a la irregularidad de las edificaciones que por lo general tienen escaleras o pueden estar ubicadas en terrenos desnivelados. El robot debería ser capaz de superar cualquier tipo de obstáculo desde pequeños de 0.4m hasta muy grandes de 2m, ya sea esquivándolos o pasando sobre ellos.
Preferiblemente el robot debería soportar caídas de 4m y si es posible de más, esto al tomar en cuenta que operaría en edificaciones que por lo general son de 2 o más plantas. La temperatura promedio que el robot enfrentará en los entornos en los que operaría sería de 400°C por lo que debería llevar protecciones dimensionadas para soportarla.
En el cuadro 3 se muestra el resumen de las especificaciones de diseño que debe cumplir el robot según lo analizado en los puntos anteriores.

Especificación	Valor
Largo	75cm – 120cm
Ancho	50cm – 75cm
Alto	20cm – 40cm
Altura con brazo	0.6m - 1m
Peso	30Kg – 50Kg
Carga adicional	20Kg
Velocidad	5Km/h – 15Km/h
Pendiente mínima superable	45°
Vibración mínima resistible	500Hz
Distancia de operación mínima en exteriores	400m
Distancia de operación mínima en interiores	200m
Ángulo de visión vertical	180°
Ángulo de visión horizontal	90° - 120°
Resolución mínima	640 x 480 píxeles
Cuadros por segundo	30 fps
Temperatura ambiente mínima resistible	500°C
Temperatura interna admisible	0°C - 40°C
Humedad relativa interna máxima	10 %
Caída mínima resistible	3m
Tiempo de funcionamiento mínimo	1H
Costo máximo	$4500

Cuadro 3: Especificaciones para el diseño del robot

Diseño Funcional

Se define el diseño funcional del robot de la manera que se ve en el esquema de la figura 21, ahí se ve como los bloques se deben interconectar entre sí para conformar el sistema. Primeramente debe haber una unidad central de procesamiento a la cual se conectarán el resto de bloques, esta enviará comandos hacia el bloque de potencia y recibirá datos de los sensores internos, sensores externos y dispositivos para visión y audición.

El bloque de potencia será encargado de manejar los actuadores, de los cuales se mediaran variables mediante sensores. Habrá un bloque de comunicación que estará íntimamente ligado al bloque central, y por el cual se enviará la información hacia el usuario. Sobre todo esto actuará el bloque de suministro de energía. Y finalmente, existirán equipos para la interfaz de usuario, los cuales serán externos al robot.

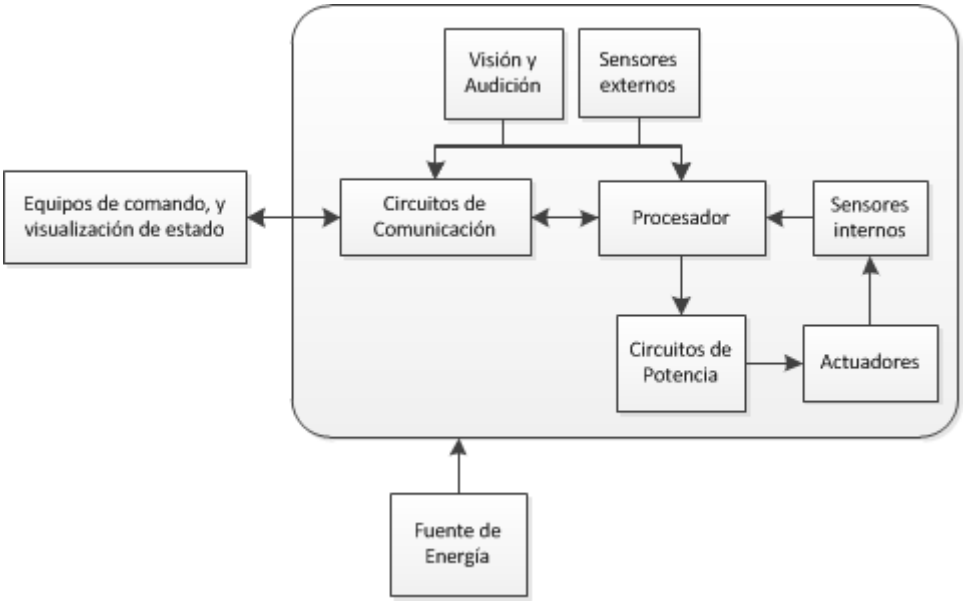


Figura 21: Esquema a bloques del diseño funcional

2.3 DEFINICIÓN DE SENSORES, ACTUADORES Y ELEMENTOS DE CONTROL

La definición de los equipos que se usarán en el robot se realiza mediante un método de elección en primer lugar del tipo de tecnología mas conveniente, para luego proceder a elegir el dispositivo específico. A continuación se explica la metodología usada para la definición de cada bloque de acuerdo al diseño funcional revisado anteriormente, y se dan a conocer los resultados del procedimiento.

2.3.1 *Elección de Tecnologías*

Se escogen las diferentes tecnologías a ser utilizadas mediante un sistema de puntuación de sus características en base a parámetros requeridos por la aplicación definidos en los puntos anteriores de este capítulo. Se utilizan valores negativos en caso de que la característica sea una desventaja y valores positivos para cuando es una ventaja, los valores van desde el -10 hasta el 10 y son escogidos de acuerdo al criterio de los diseñadores en base a las características de cada tecnologías; al final se suman todos los valores y se escogen los de mayor puntuación. En el anexo B se encuentran las tablas utilizadas para obtener los resultados de acuerdo a la metodología.
A continuación se definen los objetivos para cada característica de cada bloque del robot y se indica la tecnología elegida.

Interfaz de Usuario

El objetivo general es entregar al usuario una experiencia agradable y completa de control del robot, de esto se derivan los objetivos para las siguientes características:

- Intuición.- Que una persona adulta con conocimientos básicos en uso de computadoras y robots pueda intuir el manejo de la interfaz.
- Abstracción.- Que el usuario con conocimientos básicos del funcionamiento del robot y del entorno en el que se desempeña, pueda operar el robot.
- Facilidad de uso.- Que el usuario tenga que hacer movimientos cortos y de exactitud media y tenga la información en el espacio más reducido y simple.
- Estética y Ergonomía.- Manipulable por una persona adulta promedio en posición sentada, con un soporte físico para los controles.
- Cantidad de acciones.- Que toda la funcionalidad del robot se refleje en el mando.
- Tiempo de vida.- Que tenga un mantenimiento mínimo con garantía de 3 años.

- Portabilidad.- Que se pueda implementar con facilidad en un vehículo de emergencias.

Las opciones para utilizar son: teclado y ratón, palanca y joystick, instrumentos virtuales, lenguaje corporal y señales corporales. Se escoge el uso de palancas o joystick debido a su gran capacidad de acciones y mayor facilidad de uso, y se complementa con el uso de instrumentos virtuales que aumentan la intuición, abstracción, tiempo de vida y portabilidad de los controles.

Sistema de procesamiento

El objetivo general es la capacidad de manejar apropiadamente todos los recursos del robot, de esto se derivan los objetivos para las siguientes características:

- Velocidad de Procesamiento.- Que este dentro de las velocidades de los sistemas embebidos actuales para poder tener evolución de software.
- Recursos.- Debe poseer variedad de interfaces para comunicación con otros periféricos.
- Método de programación.- Capacidad de implementar programas pesados típicos de inteligencia artificial.
- Procesamiento en tiempo real.- Debe tener soporte para software en tiempo real.
- Especialización.- Debe tener certificaciones para su funcionamiento en robots.
- Flexibilidad.- posibilidad de ser sujeto a futuras mejoras en cuanto a su capacidad de procesamiento e integración de nuevos componentes.
- Consumo de energía.- Debe consumir la mínima energía posible de acuerdo con sus características de desempeño; con certificación energy star.
- Temperatura de Funcionamiento.- dentro del rango máximo de temperatura interna del robot.

- Ambiente de funcionamiento.- Debe tener soporte para su funcionamiento en ambientes hostiles o industriales.

Las opciones a utilizar son: microcontrolador, FPGA, DSP y Sistema microprocesado. Se elige usar un sistema microprocesado ya que posee la mayor velocidad de procesamiento, mayor cantidad de recursos y mayor flexibilidad; a pesar de que no tiene la mayor eficiencia en consumo de energía que puede ser solventado por una buena tecnología para alimentación.

Tecnología de visión y audición

El objetivo general es que pueda contribuir para ofrecer al usuario de teleprecencia utilizando la menor cantidad de recursos posible, de esto se derivan los objetivos para las siguientes características:

- Volumen requerido.- que sea lo suficientemente pequeña para moverse con libertad dentro del robot .
- Desarrollo de la tecnología.- debe ser compatible con los equipos de comunicación modernos, y debe tener características avanzadas como visión térmica.
- Iluminación.- capaz de funcionar con visión nocturna.
- Campo de vista.- debe cumplir con los requerimientos generales del robot.
- Flexibilidad de características de visión.- que se pueda configurar sus características como zoom, enfoque, ángulo de visión, etc. para acomodarse a la persona.
- Transmisión de la señal.- que se pueda enviar la señal a través de una red de datos inalámbrica.

Las opciones a utilizar son: USB, FireWire, IP, Analógico, Analógico+IP. Se elige utilizar un sistema analógico ya que es una tecnología muy desarrollada que entrega gran flexibilidad en las aplicaciones, y se complementa con el uso de equipos IP para obtener el medio de comunicación óptimo.

Circuitos de comunicación

El objetivo general es que cumpla con los requerimientos de distancia de comunicación de 200m y ancho de banda pico de 15Mbps para vídeo por cada cámara, según la compresión MPEG para una resolución de 640x480 píxeles y 30 fps, además hasta 2 Mbps para señales de control y monitoreo por lo que debe también ser full-duplex. Debería también soportar la multiplicación de tramas de datos entre vídeo y control, de esto se derivan los objetivos para las siguientes características:

- Frecuencia de Trabajo.- debe ser gratuita, porque no se trabaja en grandes distancias en donde se hace necesario la regulación de frecuencias.
- Conexión a internet.- debe tener compatibilidad para conexión a internet.
- Transmisión de la señal.- que pueda funcionar en ambientes cerrados, con obstáculos que atenúan la señal y con fuentes de ruido electromagnético.
- Flexibilidad.- que se pueda conectar a otros tipos de redes, y que pueda evolucionar en el futuro.
- Facilidad de conexión.- debe ser un estándar que implementen el resto de equipos que lleva el robot.

Las opciones a utilizar son: Wifi, Wimax, 4G, MotoWi4. Se elige usar Wifi que utiliza frecuencias gratuitas y entrega una gran flexibilidad y facilidad de conexión, por lo que su uso resulta lo mas eficiente considerando los requerimientos de transmisión de datos del robot.

Actuadores y su fuente de energía

El objetivo general es que debe tener la capacidad de entregar la potencia requerida para desplazar el peso del robot por todo terreno, y debe funcionar correctamente durante el tiempo adecuado que dura una situación de emergencia, de esto se derivan los objetivos para las siguientes características:

- Relación Espacio/Potencia.- debe cumplir con la potencia requerida ocupando el menor espacio posible.

- Relación Peso/Potencia.- debe cumplir con la potencia requerida con el menor peso posible.
- Eficiencia.- requiere de eficiencia energética de al menos 85 %.
- Portabilidad.- la fuente de energía debe ser fácilmente almacenable y transportable.
- Duración.- debe suministrar energía durante 1h de uso promedio.
- Controlabilidad.- debe ser finamente controlable con una respuesta temporal óptima para la aplicación.

Las opciones a utilizar son: Eléctricos, Hidráulicos, Neumáticos. Se escoge el uso de actuadores eléctricos y baterías, ya que resulta la opción más eficiente al tener una alta relación espacio/potencia y se caracteriza por su gran portabilidad; además que específicamente para su uso en el robot ofrece la mejor controlabilidad por lo que generalmente es utilizado en este tipo de aplicaciones.

Circuitos de potencia

El tipo de circuitos de potencia se elige específicamente de acuerdo a los requerimientos eléctricos de los elementos.

Sensores

Para cumplir con las necesidades del robot se deben utilizar varios tipos de sensores de diferentes tecnologías, pero se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- No se pueden colocar sensores en el exterior del robot, lo que dificulta el uso de sensores activos, por lo que se debe preferir usar sensores pasivos.
- El robot debe explorar distintos lugares cerrados, por lo que no se puede utilizar sensores globales sino locales.
- De acuerdo a la necesidad de las variables a medir se requerirán diferentes sensores propioceptivos y exteroceptivos.

2.3.2 *Elección de Dispositivos*

De acuerdo a las tecnologías escogidas se elabora el diseño general electrónico de dispositivos que se ve en la figura 22. Según este esquema se escogen los equipos y dispositivos específicos más relevantes para la aplicación del robot.

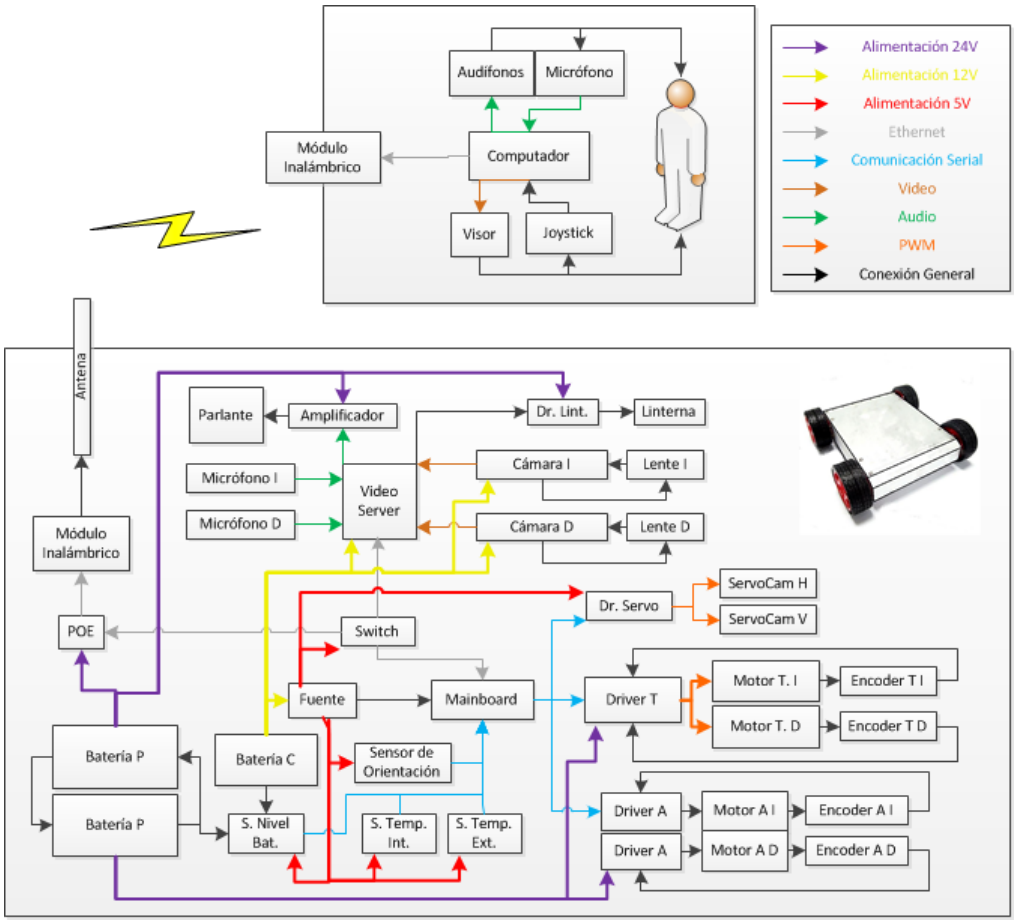


Figura 22: Diagrama Electrónico de Dispositivos

A continuación se definen los parámetros requeridos por los cuales los equipos son escogidos:

Visión y Audición

Se detallan las características de cada elemento a continuación:

- Cámara:
  - Sensor CCD 1/3”
  - Visión nocturna
  - Resolución: especificada en los parámetros 640 x 480 píxeles
  - Frecuencia: especificada en los parámetros: 30 fps
  - Montura para lente compatible C/CS
  - Alimentación a Corriente Continua: 12V, 5V o 3.3V
  - Salida de vídeo: analógica NTSC
- Lente:
  - Montura tipo C/CS
  - Formato de imagen: 1/3”
  - Distancia Focal variable: 3 – 8.5mm
  - Rango Iris: F1.0 – F360
  - Rango Enfoque: 0.2 - infinito
  - Ángulo de visión horizontal: 70°
  - Ángulo de visión vertical: 45°
- Micrófono:
  - Sistema estéreo
  - Diagrama polar: cardioide
  - Sensibilidad: -60dB
  - Tipo: piezoeléctrico
  - Con auto-ganancia

Comunicación

Se realiza primeramente el cálculo del enlace de acuerdo a la RECOMENDACIÓN UIT-R P.1238-4 que indica que se pueden calcular las pérdidas en los enlaces en interiores con la ecuación 2.1. De acuerdo a las tablas de la recomendación que se muestran en la figura 23, se puede realizar el cálculo para una aplicación específica.

$$L_{total} = 20log_{10} + Nlog_{10}d + L_f(n) - 28 \tag{2.1}$$

En donde:

- N = coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia, figura 23a
- f = frecuencia en MHz
- d = distancia de separación en metros entre estaciones
- Lf = factor de pérdida de penetración en el suelo o pared, figura 23b
- n = número de pisos o paredes que intervienen

Realizando el análisis para el peor de los casos en edificios de oficinas con un promedio de 3 paredes que se interponen, n= 3, a una frecuencia de trabajo de 2.4GHz y distancia de 200m se tienen los siguientes parámetros:
N= 30, Lf = 15 + 4(n-1), n = 3, f= 2400, d= 200

$$L_{total} = 20log_{10}2400 + 30log_{10}200 + 15 + 4(3-1) - 28$$

$$L_{total} = 20 * 3{,}38 + 30 * 2{,}3 + 15 + 8 - 28$$

$$L_{total} = 131{,}6$$

Siguiendo el mismo análisis con diferentes parámetros se tienen los siguientes datos de pérdidas:
N= 28 Lf = 4n n = 5 f= 2400 d= 100

$$L_{total} = 115{,}6$$

Coeficientes de pérdida de potencia, N, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	–	33	20
1,2-1,3 GHz	–	32	22
1,8-2 GHz	28	30	22
4 GHz	–	28	22
5,2 GHz	–	31	–
60 GHz(1)	–	22	17
70 GHz(1)	–	22	–

(a) Coeficientes de pérdida de potencia

Factores de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n \geq 1$)

Frecuencia	Edificio residencial	Edificio de oficinas	Edificio comercial
900 MHz	–	9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos)	–
1,8-2 GHz	$4n$	$15 + 4\,(n-1)$	$6 + 3\,(n-1)$
5,2 GHz	–	16 (1 piso)	–

(b) Factores de perdida de penetración

Figura 23: Coeficientes y factores de pérdida. *(Fuente: RECOMENDACIÓN UIT-R P.1238-4)*

N= 22 Lf = 6 + 3(n-1) n = 3 f= 2400 d= 150

$$L_{total} = 99{,}478$$

Una vez obtenido estos valores se pueden definirá las características de los equipos:

- Transceptor Inalámbrico en el lado del usuario:
- Diferencia entre potencia y sensibilidad de mínimo 120dB
  - Ganancia de antena mínimo 10dB
  - Ángulo de Azimuth y Elevación mínimo 30°
  - Estándar 802.11 b/g
- Transceptor Inalámbrico en el robot:

  - Diferencia entre potencia y sensibilidad de mínimo 120dB
  - Posibilidad de conectar antena externa
  - Estándar 802.11 b/g
- POE:
  - Inyección pasiva
  - Entrada DC de 12V- 24V
- Antena:
  - Omnidireccional
  - Largo máximo de 25cm
  - Mínima ganancia de 3dB
- Switch:
  - 4 Puertos
  - Estándar 100Base-T
  - Alimentación 12V
- Vídeo Server:
  - Entradas de vídeo: 3 para implementar, 1 para expansión
  - 2 entradas de audio
  - 1 salida de audio
  - Compresión de vídeo MPEG
  - Estándar de vídeo NTSC
  - Alimentación 12V

Actuadores

Se realiza el cálculo para determinar la potencia que consumirá el Robot tomando en cuenta que la pendiente máxima sera de $45°$. Se utilizo un análisis del trabajo que realizara el Robot para estar en movimiento a una

velocidad promedio de *10 Km/h* si se conoce que la potencia viene dada por la ecuación (2.2).

$$P = \frac{W}{t} \tag{2.2}$$

En donde W es el trabajo y t es el tiempo. Se conoce también que el trabajo esta dado por la ecuación (2.3).

$$W = F \times d \tag{2.3}$$

Entonces podemos determinar que la potencia viene dada también por la ecuación 2.4.

$$P = F \times \frac{d}{t} = F \times v \tag{2.4}$$

Se tiene como dato que la v = *10 Km/h* y la masa del robot es de *40 Kg*, de esta manera podemos determinar la fuerza neta que el robot debe superar para que se ponga en movimiento sin problemas como se indica en la figura 24. El peso a desplazar y que genera gasto energético se determina mediante la ecuación 2.5, por lo que de acuerdo con el principio de conservación de la energía la potencia necesaria para mover el Robot viene dada por la ecuación 2.6. [45].

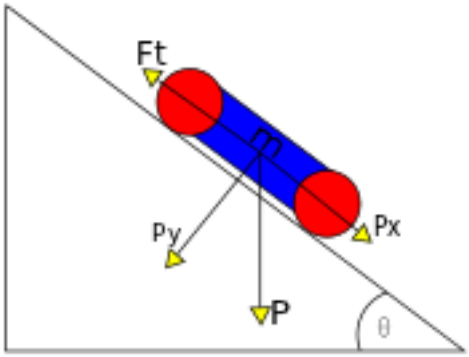


Figura 24: Distribución del Peso Pendiente

$$P_x = m \times g \times sen\,(\theta) \tag{2.5}$$

$$P_T = P_x \times v + P_{pe} + P_{pm} \tag{2.6}$$

en donde P_x es el Peso Neto del Robot, P_T es la potencia total consumida por el Robot, P_{pe} es la potencia de perdidas eléctricas y P_{pm} es la potencia de perdidas mecánicas.
La potencia requerida por cada motor considerando que la carga se encuentre uniformemente distribuida en cada motor viene dada por la ecuación 2.7.

$$P_M = P_T/2 + P_{peM} + P_{pmM} \tag{2.7}$$

en donde P_M es la potencia del motor, P_{peM} es la potencia de perdidas eléctricas del motor y P_{pmM}es la potencia de perdidas mecánicas del motor junto con las perdidas mecánicas de la transmisión de potencia hacia las llantas.
Lo valores de potencia obtenidos para cada ángulo de inclinación se muestran en el cuadro 4.

PENDIENTE	PESO NETO [N]	POTENCIA MOTOR [HP]
0°	0	0.15
23°	191.653	0.399
45°	346.835	0.602

Cuadro 4: Potencias a diferentes pendientes.

Conjunto Sensorial

Se detallan las características que cada sensor de cumplir a continuación:

- Encoder para motor de tracción:
  - 256 pulsos por revolución
  - 100 – 5000 RPM
  - Salida Analógica
- Potenciómetro para motor auxiliar:

  - 10 Kohm
  - Vuelta continua

- Sensor de Aceleración:
  - Sensitividad 2g – 6g
  - 3 ejes
  - Salida Analógica
  - Ancho de banda 100Hz

- Sensor de Razón de Giro:
  - 100°/s – 300°/s
  - Interfaz SPI
  - Ancho de Banda 88Hz

- Sensor de Humedad:
  - Resolución 12bits – 0.03 %RH
  - Rango 0 % -100 % RH
  - Interfaz I2C

- Sensor de temperatura interna:
  - Rango -40°C – 125°C
  - Sensibilidad 0.04°C por bit
  - Exactitud +- 1°C
  - Interfaz I2C

- Sensor de temperatura externa:
  - Rango 0°C – 700°C
  - Termopar tipo K
  - Resolución 12bits 1024°C
  - Interfaz SPI

Circuitos de potencia

Se detallan las características de cada circuito a continuación:

- Driver para motor de tracción:
  - 2 Canales Salida de 60A por canal
  - Operación de 12V a 40V
  - Interfaz Serial RS232
  - Entradas para Encoders
  - Control de velocidad a lazo cerrado
  - Sensor de Batería y Temperatura incorporados
- Fuente de alimentación:
  - Potencia 100W
  - Factor de forma: ATX
  - Alimentación: 12V

Procesador

Se detallan las características de cada tarjeta a continuación:

- Placa Computador Central:
  - Factor de Forma Mini-ITX
  - Procesador Intel Atom, con refrigeración pasiva
  - Tarjeta LAN 100Mbits/seg
  - 8 puertos USB
  - 2 puertos UART RS232
- Módulo de adquisición de datos:
  - 10 entradas analógicas
  - 6 salidas PWM
  - Módulos de comunicación I2C y SPI
  - Comunicación serial o usb

Energía

Según las características de los motores es necesario calcular el consumo de amperios que estos van a realizar para poder cumplir con el requerimiento de funcionamiento de mínimo una hora. Según los cálculos anteriores cada uno de los motores requieren 0.15HP para mover al robot en terreno plano y en el peor de los casos en pendientes de 45° requieren 0.71HP. Se puede tomar en cuenta arbitrariamente que el robot en promedio operará subiendo pendientes de 23° por lo que requerirán en promedio 0.4HP. Entonces como se puede ver en el cuadro de la figura 25, que indica los valores de prueba de amperaje según la velocidad y la potencia de los motores, se escoge el valor promedio. Lo que da como resultado que para funcionar, los motores requieren de alrededor de 15 amperios cada uno dando un total de 30 amperios.

Dynamometer Test Results

Torque in Oz/in	Amps	RPM	HP
20	3.7	4175	.08
40	6.1	4037	.16
80	10.8	3795	.30
120	15.7	3541	.42
160	20.3	3288	.52
200	25.0	3036	.60
240	29.7	2783	.66
280	34.4	2531	.70
320	39.1	2278	.72
360	43.8	2025	.73
682	81.4	Stall	

Figura 25: Cuadro de valores probados de los motores *(Fuente: www.npcrobotics.com)*

Si se toma en cuenta que el robot no estará en funcionamiento constante todo el tiempo se puede imponer nuevamente un valor arbitrario del 50 % del tiempo en operación, por lo que si el robot debe funcionar durante una hora se puede decir que estará consumiendo energía durante media hora solamente; entonces se puede calcular lo indicado en la ecuación 2.8:

$$EB = \bar{I} * \bar{T} = 30A * 0{,}5h = 15Ah \tag{2.8}$$

- EB= Energía de la Batería
- I= Corriente consumida promedio

- T= Tiempo promedio de operación

Finalmente si se toma en cuenta que las baterías entregan 12V y que los motores funcionan a 24V, simplemente se requieren dos baterías en serie de 15Ah cada una.
De manera similar a los motores se requiere los valores promedio de potencia requerida por cada uno de los circuitos, por lo que se tiene los siguientes datos:

- Tarjeta principal = 40W / 12V = 3.333A
- Conjunto Sensorial = 0.200A
- Driver de motores= 0.200A
- Cámaras= 0.750A
- Linternas= 1.5A
- Módulo Inalámbrico= 8W / 12V = 0.666A

Lo cual sumando se obtiene la corriente total, así: $\bar{I} = 3{,}333 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}75 + 1{,}5 + 0{,}666 = 6{,}649A$.
Debido a que los circuitos si funcionarán constantemente a diferencia de los motores, se considera el tiempo de 1h de operación. Así se calcula la energía como en la ecuación 2.9.

$$EB = \bar{I} * \bar{T} = 6{,}649A * 1h = 6{,}649Ah \tag{2.9}$$

2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El diseño del sistema de control empieza por crear una arquitectura física donde se definen las tarjetas electrónicas que conforman el sistema. Luego de establecer las conexiones que rigen el comportamiento del robot por hardware, se procede a diseñar el software que se conforma por varios programas, cada uno con su función específica. A continuación se detallan estos puntos.

2.4.1 *Arquitectura Física del Sistema de Control*

La arquitectura física del sistema de control hace referencia a que dispositivos electrónicos se utilizarán y como deben estar interconectados. En base a los dispositivos elegidos en el punto 2.3.2, se puede establecer una arquitectura como la mostrada en la Figura 26. En este esquema se puede ver que el sistema consiste de una tarjeta principal que en primer lugar se debe comunicar con el computador de usuario, a través del cual la persona que controla al robot envía comandos y recibe datos de estado; todo a través de una comunicación TCP/IP. La tarjeta principal se comunica además con el circuito controlador de motores a través de una conexión serial RS232, el cual luego de recibir los comandos desde la tarjeta principal se encarga de mover los motores que tiene conectados. Por otro lado la tarjeta principal se comunica con la tarjeta adquisidora de datos a través de un puerto USB que se convierte en un puerto serial virtualizado. La daq recibe consultas para realizar la adquisición del dato comunicándose con los sensores mediante protocolos de comunicación para periféricos como I2C y SPI, o adquiriendo señales analógicas y digitales. Finalmente la tarjeta principal adquiere las señales de vídeo de las cámaras a través de los puertos USB, y envía toda la información recopilada para que la visualice el usuario.

2.4.2 *Elección del Sistema Operativo*

Las características de un sistema inmerso como un robot, hacen que sea necesario recurrir a utilizar un sistema operativo que se enfoque mas hacia la ejecución de tareas que a la interfaz con el usuario. A pesar de que existen versiones de sistemas operativos como Microsoft Windows y Mac OSX utilizables en sistemas inmersos, su alto costo y complejidad llevan a decidir por utilizar una distribución del Sistema Operativo Linux; el cual es software libre y posee una amplia comunidad que lo respalda. Existen muchas distribuciones de Linux como: Ubuntu, Debian, Red Hat, Fedora, etc., cada una con sus ventajas y desventajas, pero se decide por una una de las distribuciones minimalistas disponibles ya que la aplicación no requiere una alta cantidad de recursos sino del uso eficiente de los mismos.

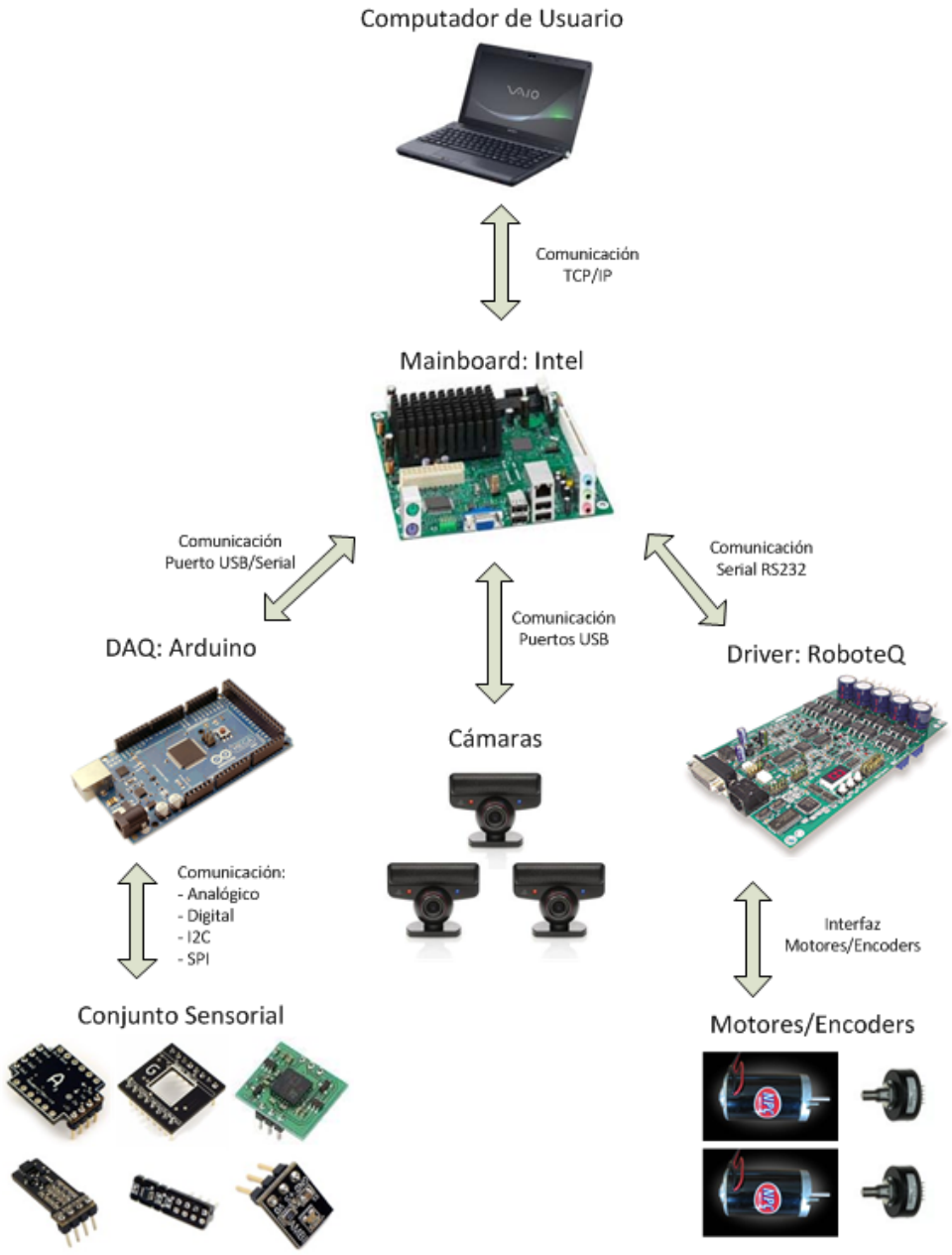


Figura 26: Arquitectura Física del Sistema de Control

Una de las distribuciones del sistema Linux que cumple con las especificaciones técnicas requeridas en el proyecto es la distribución "Puppy"

[1]. Que actualmente se encuentra en su versión 5.2.5, también conocida como "Lucid Puppy" o "lupu", y que lleva consigo el kernel en su versión 2.6.33.2. Esta distribución a más de poseer un gestor de paquetes de instalación que maneja sus propios archivos con extensión .pet y .pup, es compatible con paquetes .deb ya que fue compilada con paquetes propios de la distribución Ubuntu. Entre las ventajas que ofrece esta distribución para su aplicación como sistema operativo del robot son:

- Su pequeño tamaño de alrededor de 100MB la hace muy liviana para correr.
- Su facilidad de poder ser instalado en una memoria flash usb. Esto es principalmente beneficioso porque no es necesario incorporar una unidad de disco duro que puede dañarse por maltrato físico dentro de un robot de estas características.
- Su capacidad de correr desde la memoria RAM la hace extremadamente rápida cuando ejecuta programas, aportando al concepto de procesamiento en tiempo real.
- Se puede agregar el soporte para correr aplicaciones con múltiples hilos con manipulación de los puertos seriales y USB.

Además, en este sistema operativo es posible instalar programas que faciliten la gestión del sistema a distancia como un servidor de escritorio remoto y protocolos de compartición de archivos con otros sistemas operativos.

2.4.3 *Arquitectura del Software de Control*

La principal característica que se ha considerado al momento de diseñar el software de control ha sido la multi-funcionalidad. Esto se debe a que la tarjeta principal se debe de encargar de gestionar el procesamiento de datos sensoriales y vídeo, y, recibir y ejecutar comandos al mismo tiempo. La multi-funcionalidad se consiguió a través del desarrollo de una aplicación de múltiples hilos, que es una técnica que evita retardos entre operaciones importantes para el funcionamiento contínuo y no disruptivo del robot.

1 Para más información acerca de Puppy Linux visitar www.puppylinux.org [16]

El software de control se conforma por tres hilos que se encargan de la comunicación con el usuario, con el driver, y con la daq respectivamente. Estos intercambian información mediante el uso de una pila de datos común para todos, en la cual se almacena la información como un paquete con un formato específico. A continuación se explica detalladamente cada uno de estos puntos.

Pila de Datos

La pila es un conjunto de datos común para todos los hilos que se encuentran en ejecución. Como se encuentran en un espacio de memoria compartido, estos pueden ser leídos y actualizados en cualquier momento por cualquier hilo que lo requiera. Sin embargo, como esto puede crear conflictos cuando varios hilos intentan accederlos al mismo tiempo, se implementan técnicas de sincronización definidas por el estándar POSIX, la cuales utilizan los mutex, llamados también semáforos, que deben ser capturados siempre antes de cada acceso los datos de la pila.
La Pila de Datos, también llamada Stack, se compone de datos recibidos desde el usuario como comandos para movimiento de motores y demás, así como de datos de estado del robot que deben ser envíados para conocimiento del usuario. A nivel de lenguaje de programación, los datos son representados por estructuras de datos tipo int. A continuación se los enumera clasificándolos por la dirección en la que se lo usa e indicando su nombre entre corchetes.

- Datos recibidos desde al usuario:
  - Comandos de velocidad de los motores, [cmndX]
  - Posición rotacional de las cámaras, [serv]
  - Intensidad lumínica de las linternas, [lintX]
  - Byte de modo de funcionamiento, [modofunc]
- Datos enviados hacia el usuario:
  - Voltaje aplicado a los motores, [vmotX]
  - Corriente consumida por los motores, [ampsX]
  - Temperatura en los canales del driver, [tempX]
  - Voltaje de batería del Driver, [vbatX]

  - Velocidad leída desde los encoders, [evelX]
  - Byte de Estado del Driver, [statD]
  - Voltaje de batería principal, [voltb]
  - Temperatura interna del Robot medida en varios puntos, [tempX]
  - Temperatura externa del robot, [termk]
  - Nivel de humedad interna, [humed]
  - Retroalimentación de intensidad de las linternas, [linX]
  - Intensidad lumínica externa, [luzsX]
  - Valores de aceleración en los 3 ejes, [acelX]
  - Valores de razón de giro en los 3 ejes, [gyroX]
  - Orientación rotativa relativa al suelo, [tilts]
  - Byte de estado de la DAQ, [statA]

Hilo de Comunicación con el Usuario

La figura 27 presenta el mecanismo de comunicación con el usuario. Consiste de dos partes principales: la recepción de comandos desde el usuario para luego almacenarlos en la pila de datos, y el envío de las variables de la pila. Este proceso, que debe repetirse indefinidamente, puede ser entendido algoritmicamente mediante el diagrama de flujo que se muestra en la figura 28.
La comunicación entre la tarjeta principal y el computador del usuario se la realiza a través del envío y recepción de paquetes de datos tipo String, que representan los valores de las variables internas del robot y de los comandos que debe ejecutar. Se ha establecido un formato específico para dicha comunicación anteponiendo una letra a cada valor diferente de tal forma que se puedan distinguir unos datos de otros. A continuación se enumeran los datos en el formato del paquete utilizando los nombres establecidos en la pila de datos:

- Envía Usuario - Recibe Placa Computador Central
  - C[cmndo] [cmnd1]\n
  - S[serv]\n

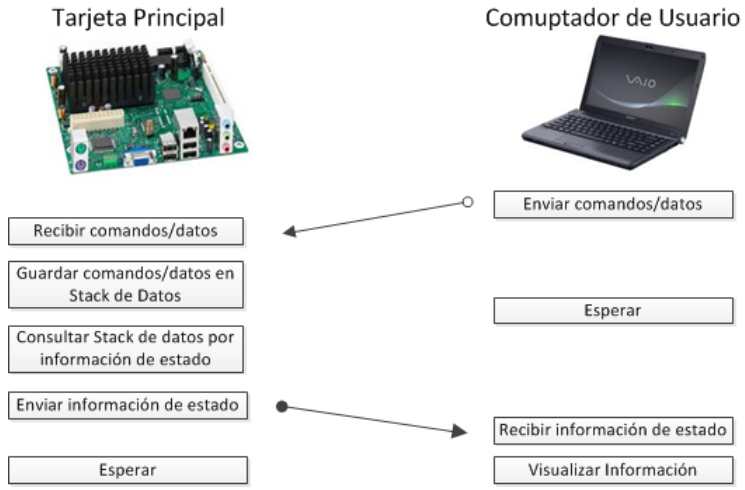


Figura 27: Comunicación Tarjeta Principal - Computador de Usuario

  - M[modofunc]\n
  - L[lintI1] [lintI2] [lintD1] [lintD2] [lintT1] [lintT2]\n

- Envía Placa Computador Central - Recibe Usuario
  - V[vmoto]_[vmot1]_[ampso]_[amps1]_[evelo]_[evel1]\n
  - P[vbato]_[vbat1]_[tempo]_[temp1]_[statD]_[oxooo]\n
  - L[linI1]_[linI2]_[linD1]_[linD2]_[linT1]_[linT2]\n //
  - T[tempD]_[tempT]_[tempI]_[tempD]_[tempC]_[termk]\n
  - F[gyroX]_[gyroY]_[gyroZ]_[acelX]_[acelY]_[acelZ]\n
  - S[statA]_[luzsD]_[luzsT]_[humed]_[tilts]_[tmpMB]\n

Hilo de Comunicación con el Driver

Esta comunicación se realiza mediante el envío de comandos y consultas desde la tarjeta principal, y la recepción de confirmaciones o datos enviados desde el driver; como se muestra en la figura 29. Estos paquetes de datos están conformados por datos tipo String de acuerdo al formato especificado en el Application Programming Interface (API) documentado

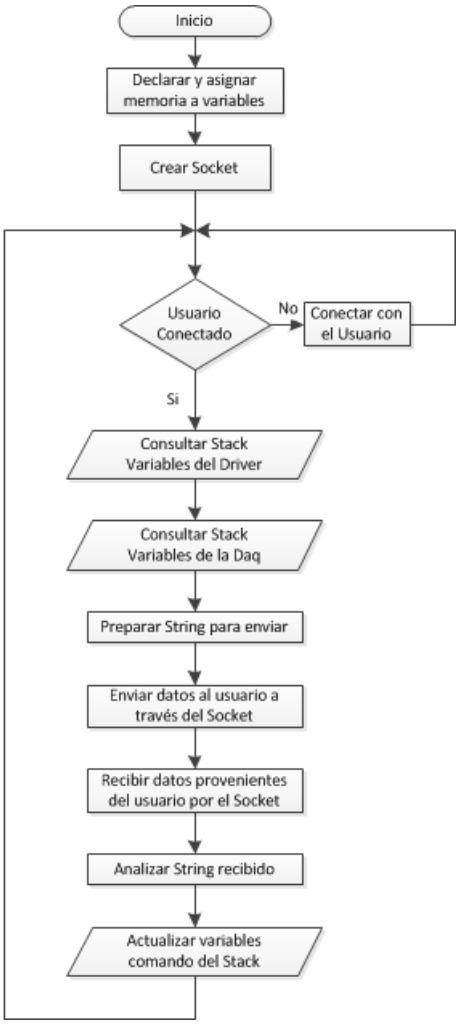


Figura 28: Diagrama de Flujo del Hilo Comunicación

en los manuales del Driver[2]. Entre los principales comandos y consultas que se pueden realizar se utilizaron los siguientes:

- !a [cmnd]\r o !A [cmnd]\r, comandar velocidad del motor A
- !b [cmnd]\r o !B [cmnd]\r, comandar velocidad del motor B
- *A8\r - *AF\r, comandar posición de servomotores

2 Revisar Manuales de Programación del Driver RoboteQ AX3500 para obtener información completa de la lista de comandos y consultas.

- ?A\r, consultar corriente en los motores
- ?V\r, consultar voltaje aplicado a los motores
- ?M\r, consultar temperatura en los manejadores de los motores
- ?E\r, consultar voltaje de la batería
- ?K\r, consultar velociad de los motores
- ^89\r, consultar estado del driver

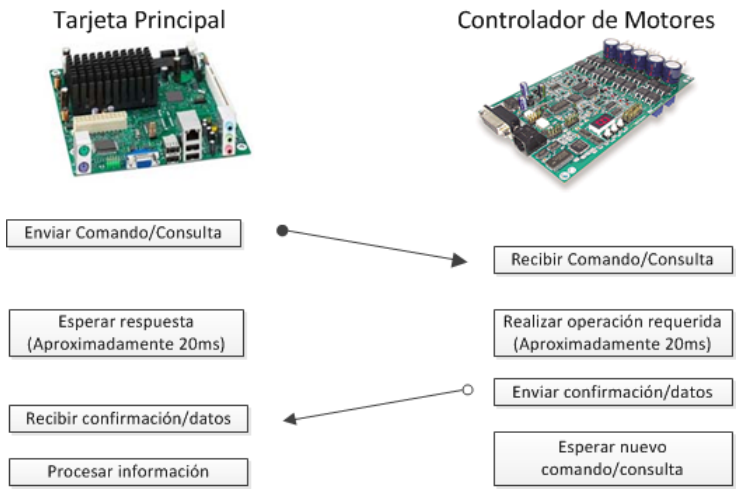


Figura 29: Comunicación Tarjeta Principal - Controlador de Motores

La tarjeta principal debe realizar consultas y enviar comandos al driver continuamente de tal forma que el usuario posea un control no interrumpido sobre el robot. Debido a que el driver tiene un retardo de procesamiento para adquirir valores o ejecutar comandos, no es posible consultar todo sin tener como consecuencia una pérdida de fluidez. Por ello se desarrolló algo parecido a una máquina de estado en la que se toma turnos para consultar una u otra variable de acuerdo a su grado de importancia; considerando como prioritario el envío de comandos de velocidad para los motores. Este proceso puede ser apreciado en el diagrama de flujo de la figura 30.

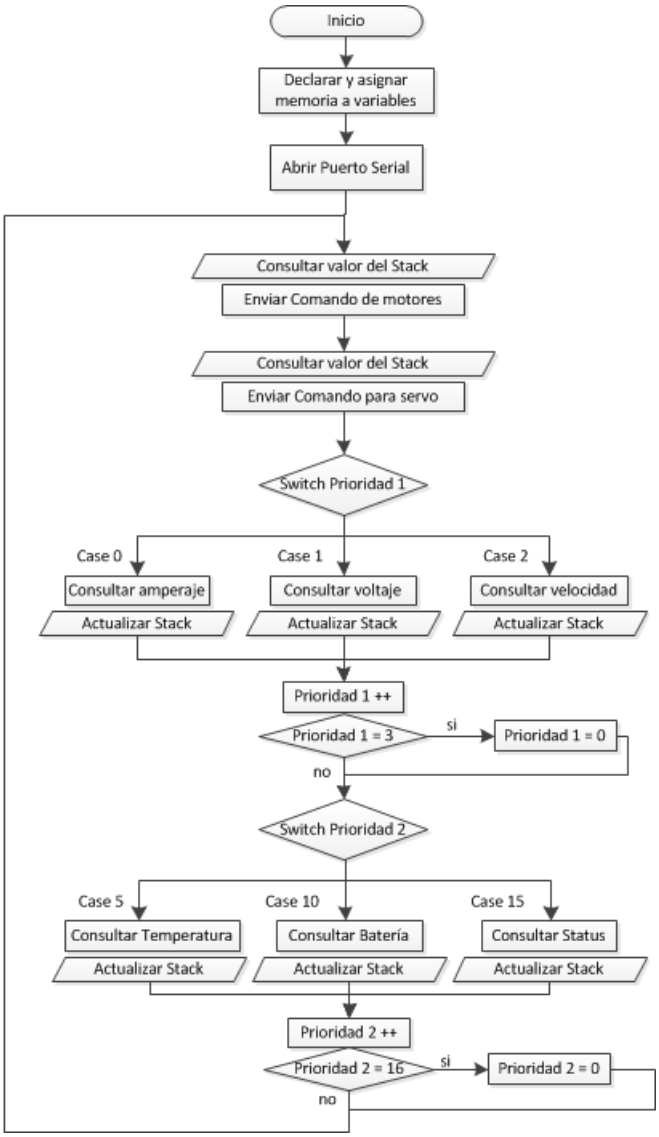


Figura 30: Diagrama de Flujo del Hilo RoboteQ

Hilo de Comunicación con la DAQ

Esta comunicación se implementó de manera análoga a la comunicación con el driver (ver figura 31). De igual manera, se envían comandos y consultas para recibir respuesta desde la daq, y se toma también un formato similar en el paquete de datos; difiriendo nada más en las

variables disponibles. A continuación se describe el formato de consultas y comandos:

- !L [lintI1] [lintI2] [lintD1] [lintD2] [lintT1] [lintT2]\r, intensidad de linterna
- !M [modofunc]\r, cambiar modo de funcionamiento
- ?T\r, consulta temperatura interna
- ?K\r, consulta temperatura externa
- ?H\r, consulta humedad
- ?Z\r, consulta iluminación externa
- ?L\r, consulta intensidad de linterna
- ?G\r, consulta razón de giro en 3 ejes
- ?A\r, consulta aceleración en 3 ejes
- ?I\r, consulta orientación rotacional
- ?S\r, consulta estado de la DAQ

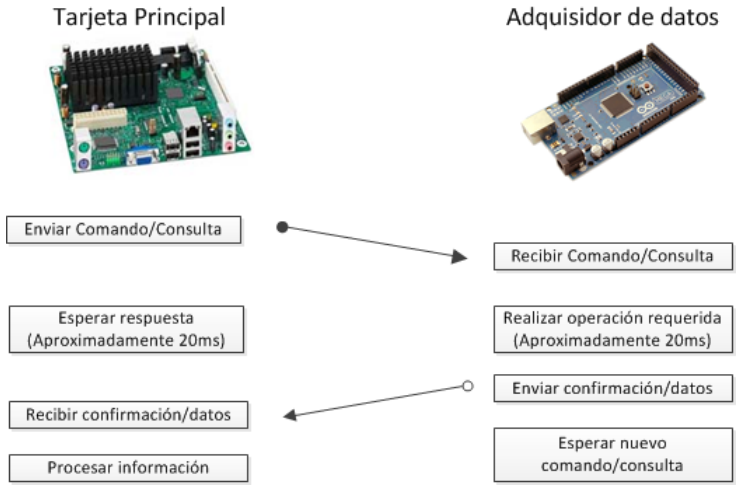


Figura 31: Comunicación Tarjeta Principal - Adquisidor de Datos

De forma similar a la comunicación con el driver, se realiza una actualización continua mediante las consultas a la DAQ; dando prioridad a las variables mas importantes como la aceleración y la razón de giro. Este proceso se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 32.

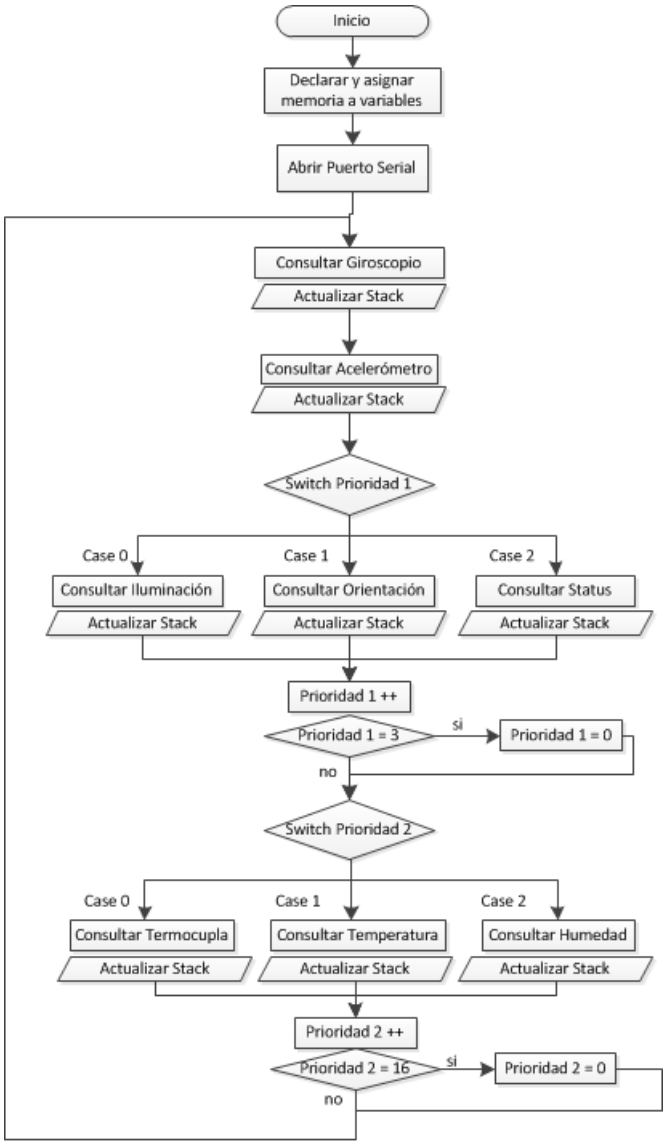


Figura 32: Diagrama de Flujo del Hilo Arduino

Integración del Software

Debido a que los tres hilos de comunicación vistos en los puntos anteriores trabajan con la misma Pila de Datos, es necesario unirlos en un solo entorno de ejecución. Esto es solucionado como un programa de múltiples hilos, en el cual existe un hilo principal, que en este caso es el de comunicación con el usuario, que da inicio a los otros hilos de comunicación con el driver y comunicación con la daq. Para que cada hilo logre acceder a la pila sin causar problemas es necesario implementar los llamados mutex o semáforos que se encargan de bloquear a un segundo hilo si este intenta acceder a la pila al mismo tiempo.
Existe la posibilidad de implementar un hilo que se encargue de dar inteligencia al robot para asistir al usuario en la toma de decisiones para manejar al robot. De manera general se puede representar al programa de control como se muestra en la figura 33.
El software fue desarrollado en lenguaje de programación C++ [3]. Esto debido a la facilidad para trabajar con encapsulación de código, pero también por las características que permiten la manipulación a bajo nivel. Se debieron utilizar algunas librerías que cumplen con el estándar POSIX (mantenido por The Austin Comon Standars Revision Group [4]), el cual es soportado por el sistema operativo y requerido para la manipulación de los puertos seriales y la programación con hilos.

2.4.4 *Software de Adquisición de Datos*

De acuerdo con las secciones 2.3.2 y 2.4.1 se utiliza el Hardware Arduino para la adquisición de datos de los diferentes sensores. En éste se implementa el software necesario para la comunicación con la tarjeta principal, y la comunicación y lectura del grupo de sensores de la sección 2.3.2; que comprende de: los sensores de temperatura y humedad, acelerometros, giroscopios y sensores de luz; y el control de la intensidad de luz de las linternas.
Para esto se ha distribuido el tiempo del procesador de la tarjeta Arduino en tres hilos de ejecución:

3 Para mas información sobre el lenguaje C++ visitar www.cplusplus.com[4]
4 Para mas información acerca de TACSRG visitar www.opengroup.org [11]

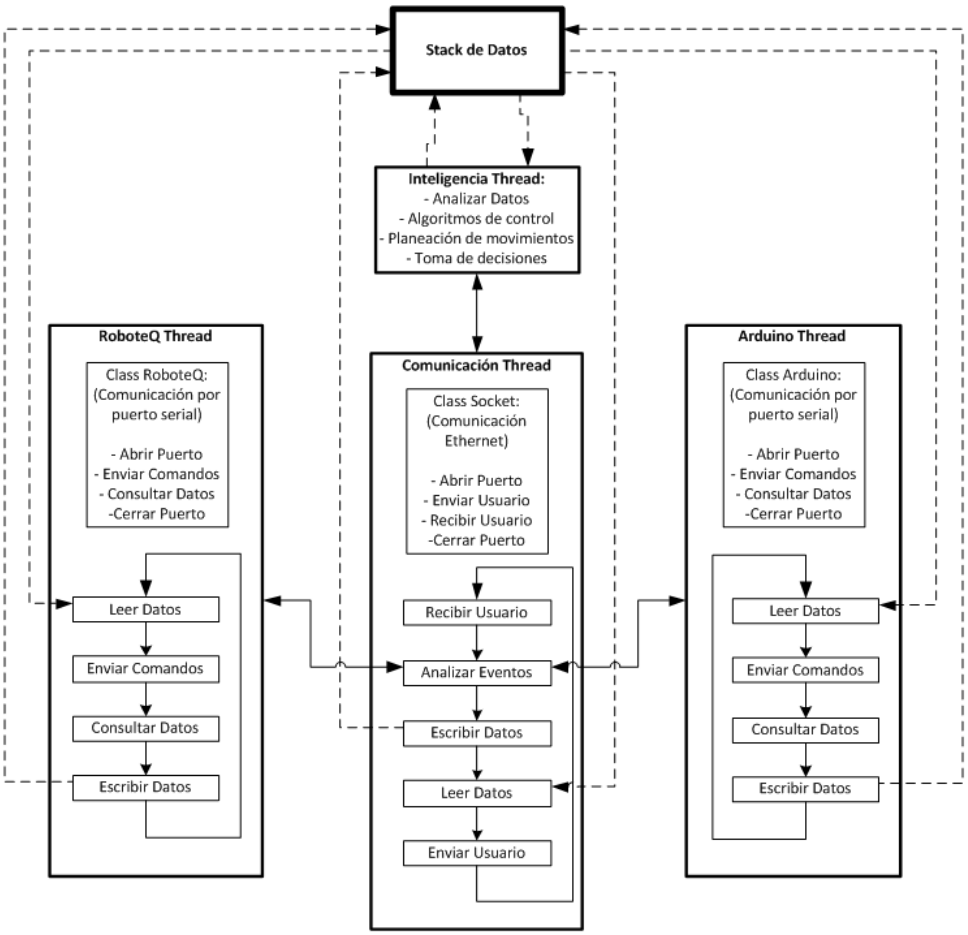


Figura 33: Diagrama de integración del software

1. Maquina de estados que responde de acuerdo a los comandos y consultas enviados por la tarjeta principal (ver figura 31). Su función es la lectura de cada uno de los sensores rápidos, analógicos y Interfaz de Perifericos Serial (SPI). El proceso se ejecuta de manera periódica cada 1ms, tiempo que se controla mediante el Temporizador de Hardware interno del procesador de la placa Arduino.

2. Algoritmo de control a lazo cerrado para el control automatico de la intensidad de luz de las linternas. El proceso se ejecuta periódicamente cada 1ms, tiempo controlado por el Temporizador.

3. Proceso Principal que consiste en la lectura de sensores de temperatura y humedad (sensores lentos) mediante comunicación Interfaz de Comunicaciones de dos hilos (I2C) (Programa Principal)

La ejecución de estos tres hilos se planifica mediante el Temporizador de Hardware, en la anterior lista se enumeraron los hilos en orden de prioridad, por ende se da mayor porcentaje de uso de procesador al primero.
Para la programación del la tarjeta Arduino se hace uso del Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) disponible en la pagina Oficial de Arduino[5] bajo licencia GNU General Public License. Apoyados en el desarrollo comunitario, se puede encontrar una gran variedad de hardware que incluye software de control incluido, siendo así que el usuario programador simplemente se dedica a construir la aplicación que requiere. En el software desarrollado como Adquisición de Datos (DAQ) y Servidor de Datos Dedicado, se hizo uso de librerías necesarias para utilizar el sensor de temperatura y humedad con comunicación I2C, a los cuales se les debió aplicar actualizaciones para que soporten varios dispositivos con diferentes direcciones al mismo tiempo. Además se usaron todas las librerías propias del lenguaje de programación de Arduino que son compatibles con el compilador avr-gcc, que permite el uso de lenguajes como C/C++ en combinación con el lenguaje propio de Arduino. Esto hace que el programador pueda ir a nivel tan bajo como ensamblador hasta llegar a un nivel alto como es el lenguaje propio de Arduino. Todo esto permite hacer que las aplicaciones sean tan eficientes como sea posible así como también permite el acceso al hardware del procesador de la tarjeta Arduino en un nivel muy bajo de programación. El código fuente del software pertinente al diagrama de flujo mostrado en la figura 32 esta disponible en el CD-ROM que acompaña a esta Monografía en la carpeta de archivos titulada firmware_Sensors_hub_1.

2.4.5 *Software de Adquisición y Transmisión de Vídeo*

Para la distribución multimedia se hace uso de una red de computadoras bajo la capa física ETHERNET, que tiene compatibilidad con varias tecnologías inalámbricas entre las que podemos mencionar los estándares

5 Pagina Oficial Arduino en Español http://arduino.cc/es [1]

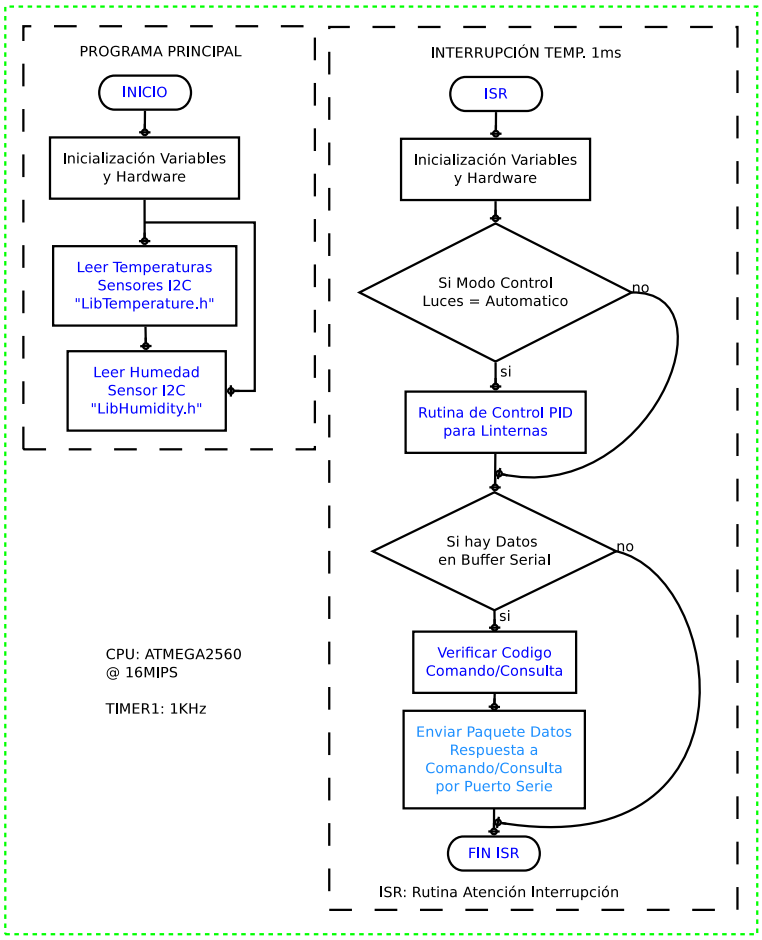


Figura 34: Diagrama de Flujo Firmware Arduino

802.11 b,g,n bajo certificación WiFi. Esta tecnología alcanza tasas que van desde 11Mbps en el 802.11 b hasta 300Mbps en el 802.11 g, que permite que sea usada para Sistemas de Vídeo Vigilancia y Teleoperación.
Para el hardware planteado en la figura 26 se emplean tres camaras con conexión USB, y se debe convertir el protocolo USB a TCP/IP. Para realizar esta tarea existen algunas opciones tales como:

1. Encapsulamiento del protocolo de los Paquetes USB en paquetes TCP/IP, que es el caso del software bajo licencia GPL denominado USB/IP[6]. La principal desventaja es que el flujo multimedia tiene un alto consumo de ancho de banda dependiendo de si la cámara

6 Pagina Oficial de USB/IP http://usbip.sourceforge.net/ [18]

cuenta o no con un Codificador integrado de Vídeo, además que el software tiene un alto consumo de CPU y dependiendo del Hardware y Sistema Operativo de la Placa Base puede o no correr sobre la misma.

2. Uso de un software especializado para realizar flujo de vídeo, entre los que se encuentran: VLC[7], FFmpeg[8], Gstreamer[9]; que son los mas importantes. Los primeros dos tienen el inconveniente de presentar un alta latencia por lo que no pueden ser usados para propósitos de teleoperación. Gstreamer presenta una excelente y muy baja latencia pero su uso se ve limitado al numero de camaras que puede transmitir al mismo tiempo, además que el procesamiento que se puede realizar con los datos de las imágenes es limitado ya que usa un protocolo tal que el Usuario y el Servidor de Vídeo deben necesariamente en sincronismo, y si cualquiera de los dos no responde disminuye drásticamente el numero de fotogramas por segundo del flujo de vídeo.

3. Por ultimo, desarrollar una aplicación que tenga como fin recuperar el flujo de vídeo proveniente de la cámara USB y enviarlo mediante sockets TCP/UDP. Esto se puede realizar de manera directa, con la desventaja que el consumo de ancho de banda es muy elevado dependiendo de la resolución de los fotogramas. Un sistema de codificación de colores RGB de 640x480 píxeles puede llegar hasta los 60Mbps, lo cual no es factible de implementar. En fotogramas de escala de grises a 8bits por píxel se tiene una tasa de 20Mbps, que tampoco es conveniente, a diferencia que implementando un Codificador MJPEG se llega a una tasa inferiores al 1Mbps dependiendo de la compresion, y por ende de la calidad del vídeo de salida. Esto se puede realizar con las API multimedia como es el caso de Gstreamer y OpenCV[10], que es el mas adecuado gracias a sus numerosas funciones dedicadas al procesamiento de imágenes.

7 Pagina Oficial de VLC http://www.videolan.org/ [19]
8 Pagina Oficial de FFmpeg http://ffmpeg.org/ [10]
9 Pagina Oficial de Gstreamer http://gstreamer.freedesktop.org/ [13]
10 Pagina Oficial de OpenCV http://opencv.willowgarage.com/ [21]

Software de Flujo de Vídeo Mediante OpenCV vision 3D

Pare el caso de visión estereo se opta por usar la API OpenCV en el cual se desarrolla el software que realiza el algoritmo representado en la figura 35. El código fuente del software esta disponible en el CD-ROM que acompaña a esta Monografía en la carpeta de archivos titulada video_server y video_client. En este caso la latencia es de una media de 500ms.

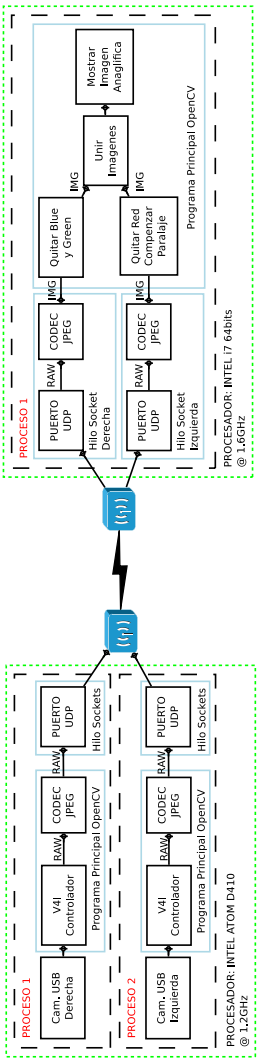


Figura 35: Diagrama de Bloques Flujo de Vídeo con OpenCV

Software de Flujo de Vídeo Mediante Gstreamer vision 2D

Pare el caso de vision simple con dos camaras se opta por usar Gstreamer para el cual se escribió una secuencia de comandos que realizan el algoritmo representado en la figura 36. El código fuente de la secuencia de comandos esta disponible en el CD-ROM que acompaña a esta Monografía en la carpeta de archivos titulada script_video. En este caso la latencia es de una media de 250ms.

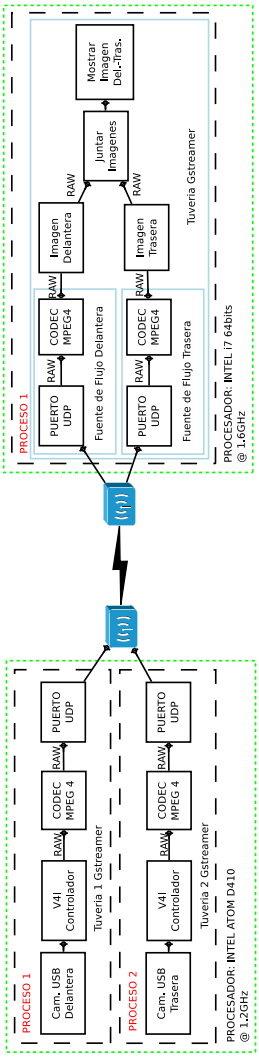
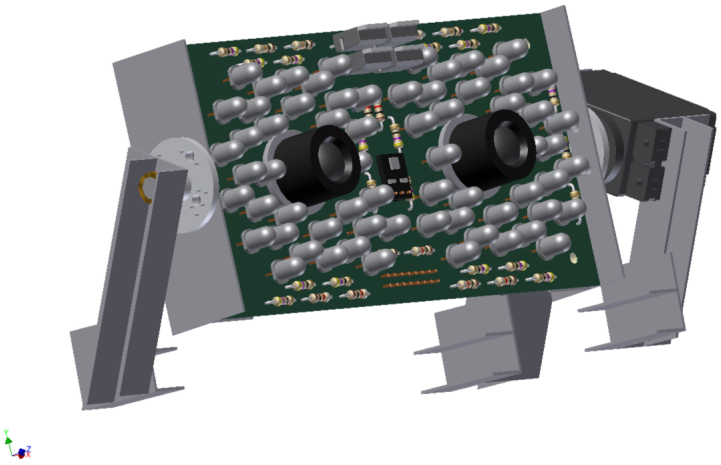


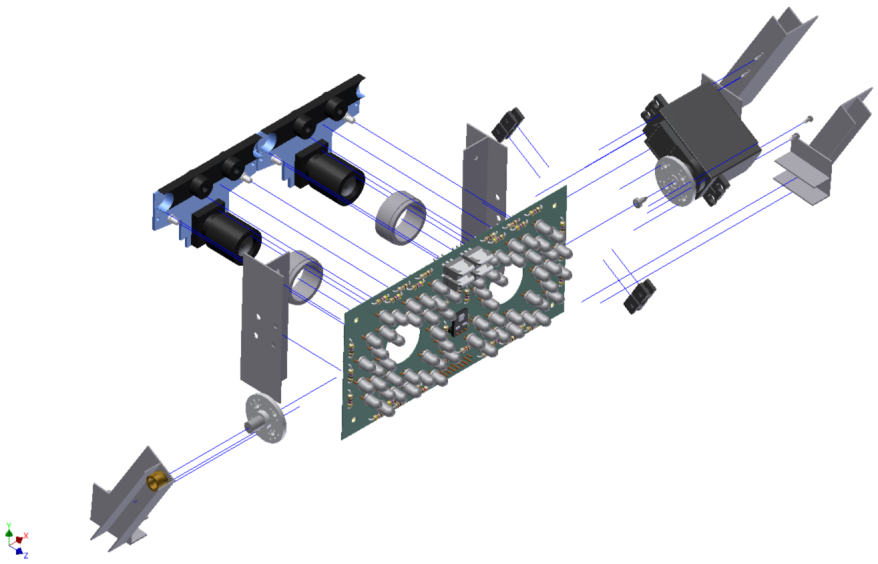
Figura 36: Diagrama de Bloques Flujo de Vídeo con Gstreamer

2.5 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

Con el objeto de tener un soporte físico para cada una de las tarjetas electrónicas de los subsistemas de control y comunicación del Robot, se realizo el dimensionamiento de una estructura metálica mediante la ayuda de un sistema Diseño Asistido por Computador del ingles Computer Assisted Design (CAD). Aquí se define utilizar el aluminio como material por sus características de peso y resistencia.
La ubicación de las tarjetas electrónicas se la realiza sobre una estructura realizada a partir de dos tipos de perfiles de aleación de aluminio 6060. El primero tipo T de 25mm de Base por 15mm de altura con espesor de 0.75mm, y el segundo tipo F de 20mm de Base por 10mm de altura con espesor de 0.75mm. En las figuras 37a y 37b se muestran los diseños del módulo de visión delantero ensamblado y desensamblado respectivamente; de igual manera se puede ver el módulo de visión trasero en las figuras 38a y 38b; y en las figuras 39a y 39b se muestra el diseño del módulo principal de control; el detalle de los diseños se muestran en los apéndices C1, C2 y C3 respectivamente. Los archivos digitales de los planos en 3D y 2D están disponibles en el CD-ROM que acompaña esta Monografía. Para mas detalles acerca del diseño del sistema mecánico de transmisión, carcasa resistente a la temperatura y sistema de locomoción, referirse a la monografía correspondiente al sistema mecánico del robot, realizada en la Universidad Politécnica Salesiana y que se titula igual a la presente monografía.

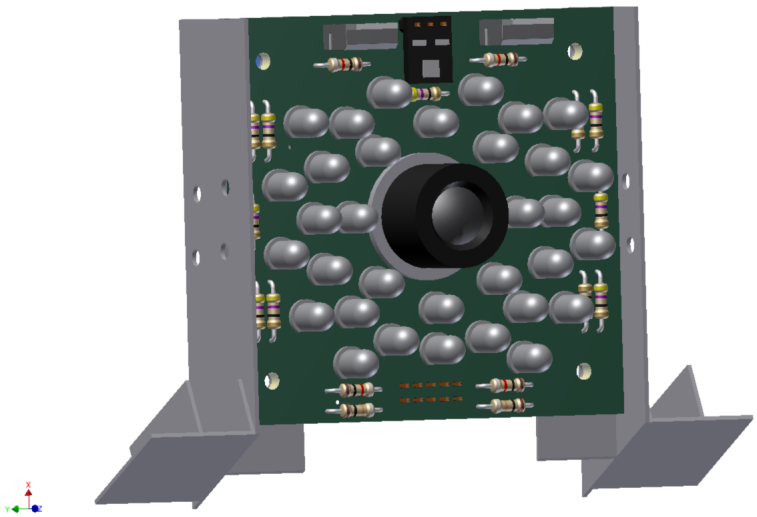


(a) Ensamblado

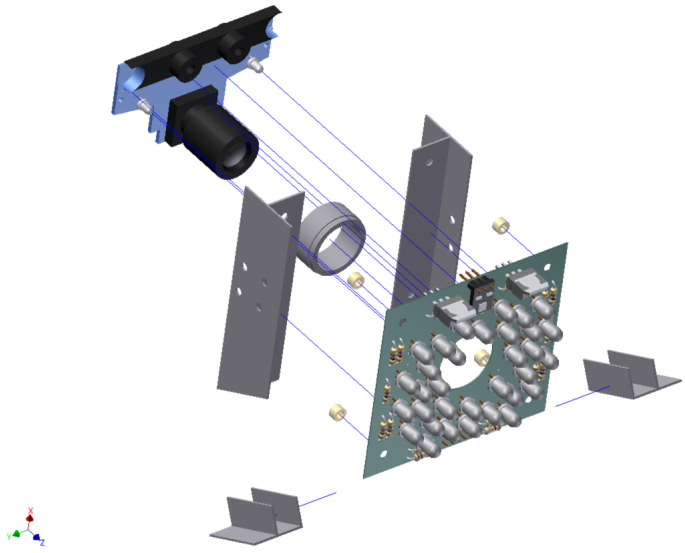


(b) Desensamblado

Figura 37: Soportes para módulo de visión delantero

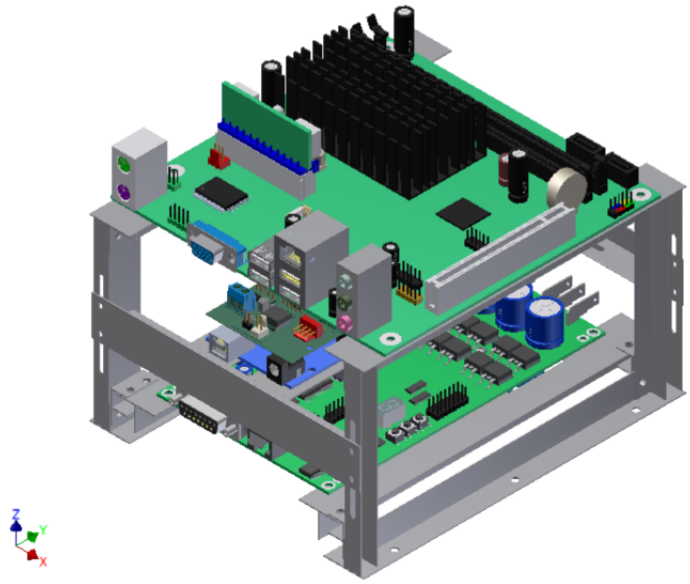


(a) Ensamblado

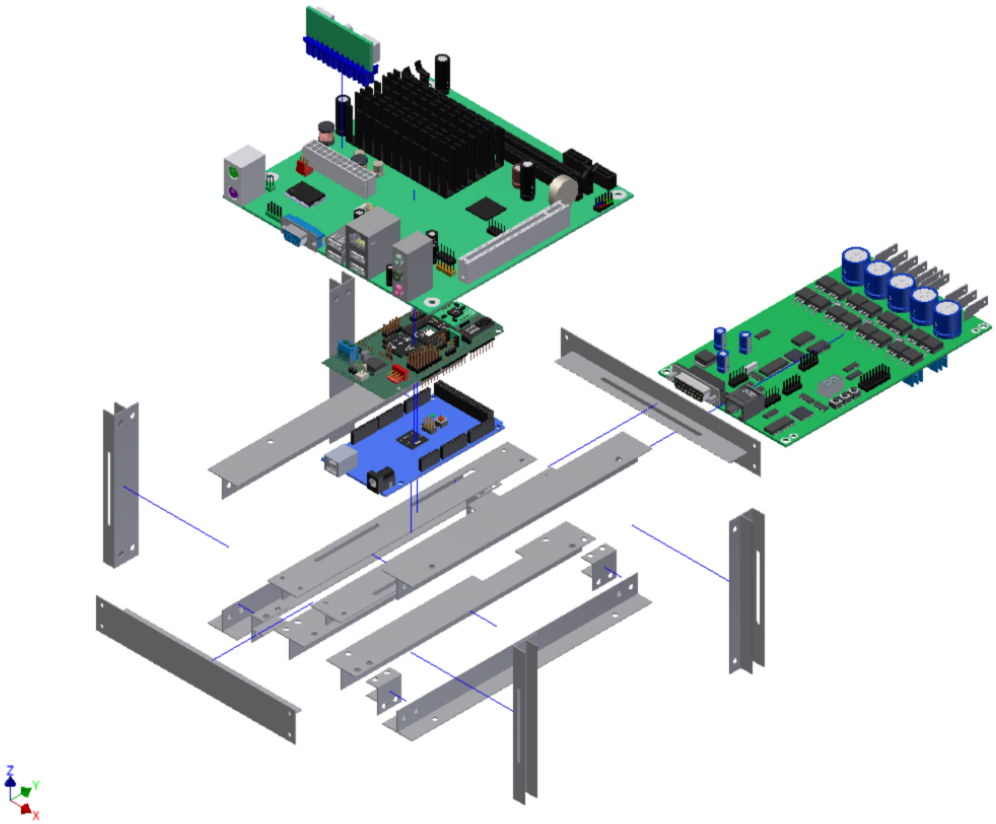


(b) Desensamblado

Figura 38: Soportes para módulo de visión trasero



(a) Ensamblado



(b) Desensamblado

Figura 39: Soportes para tarjetas de control

3

CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT MÓVIL

3.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de construcción explicado en este capítulo se divide en tres etapas: en primer lugar se fueron construyendo paralelamente las piezas mecánicas y las tarjetas electrónicas que debían ser fabricadas específicamente para la aplicación; segundo se ensamblaron por un lado las partes mecánicas adquiridas y fabricadas para formar la estructura mecánica móvil del robot, y por otro lado se ensamblaron las tarjetas electrónicas adquiridas y fabricadas junto con sus soportes mecánicos para empotramiento en la carcasa; finalmente en la última etapa se ensambló la electrónica dentro de la carcasa mecánica realizando la ubicación de los equipos y el cableado correspondiente entre los mismos. En los puntos siguientes de detallan los procesos de construcción del sistema mecánico y electrónico, y de como fue ensamblado el robot; y al final se explica el diseño de la interfaz entre el robot y el usuario.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA

El proceso explicado a continuación es un resumen de la construcción de la estructura mecánica del robot. Para obtener información mas detallada acerca de este proceso revisar la monografía complementaria que trata mas a profundidad el sistema mecánico del robot, la cual se titula con el mismo nombre que esta monografía y puede ser encontrada en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.
Para empezar el desarrollo del robot se construyó una maqueta de la carcasa (ver figura 40a), para identificar la posición correcta de los dispositivos al interior de robot, para luego proceder a la fabricación con planchas de acero. A continuación se procedió a fabricar la base metálica según el diseño (ver figura 40b).
La base y la tapa de la carcasa por motivos del aislamiento del calor interior y de acuerdo al diseño fueron rellenadas con una capa de fibra

(a) Maqueta la carcasa

(b) Base de la carcasa

Figura 40: Imágenes de la carcasa del robot

de vidrio. Una vez terminada la carcasa se la sometió a un proceso de enlozado para dotarle de mayor protección hacia el fuego (ver figura 41).

(a) Tapa de la carcasa

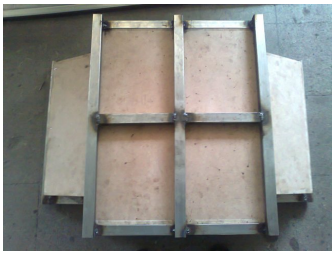

(b) Soportes para enlozado

Figura 41: Preparación para enlozado

Finalmente como se puede ver en la figura 42 se realiza el acople mecánico de los motores hacia los ejes mediante un par engranajes cónicos a 90°. Los ejes delanteros y traseros se encuentran sincronizados mecánicamente mediante cadenas que atraviesan el espacio interno del robot. Como paso final cada rueda es acoplada a su eje correspondiente.

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

Paralelamente a la construcción mecánica se desarrollaron los dispositivos de control. Además de ensamblar el módulo principal con los dispositivos adquiridos, se fabricaron tarjetas específicas para la aplicación.
En la figura 43a se puede observar la tarjeta terminada que se fabricó para albergar los sensores del robot y conectarlos hacia la tarjeta daq arduino.

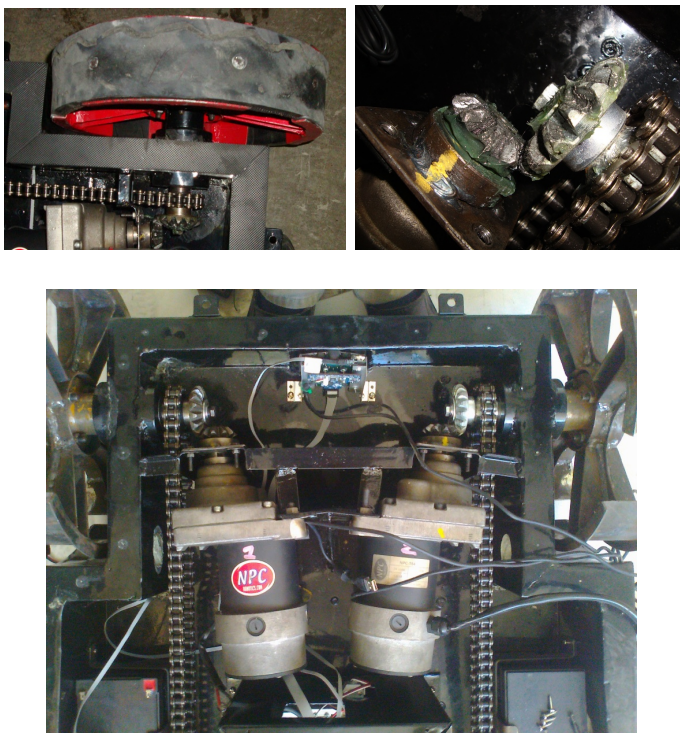
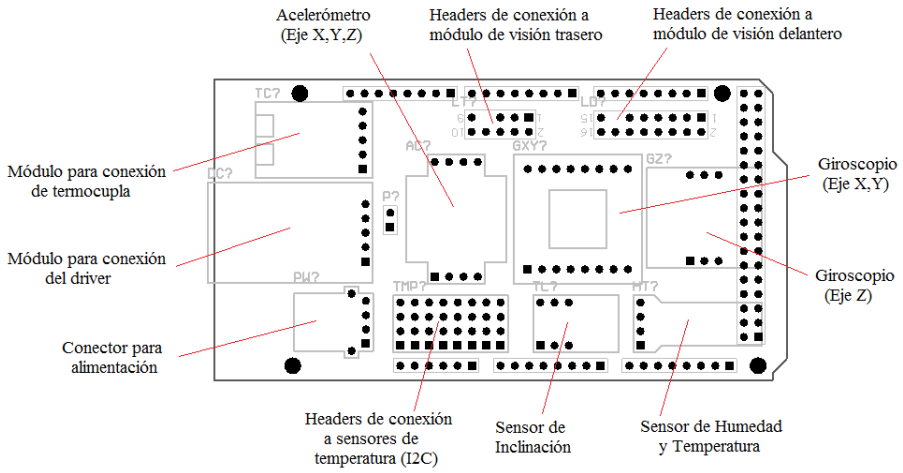


Figura 42: Estructura de la rueda

Como se puede ver, esta posee conectores donde deben conectarse los módulos y sensores externos. En la figura 43b se muestra con detalle la distribución de los componentes de la tarjeta, y se indica la función de cada conector.
Los módulos de visión que se pueden ver en las figuras 44 y 45, están conformados por una placa base que posee un sensor de luz y alrededor de 100 leds que sirven como linterna para las cámaras; las cuales se encuentran incrustadas en los agujeros de las placas. Cada módulo tiene bases hechas con perfiles de aluminio para su instalación en la carcasa, la diferencia entre el módulo delantero y trasero es obviamente que el delantero posee dos cámaras para la visión en 3 dimensiones y además tiene un servomecanismo que le da movilidad de casi 180° en el plano vertical.
El módulo principal de circuitos de control consta del computador central, driver de motores, y módulo daq conformado por el arduino y la tarjeta con los sensores. Para montar estos dispositivos se fabricaron

(a) Tarjeta fabricada



(b) Diseño de la tarjeta

Figura 43: Tarjeta de Sensores para módulo daq

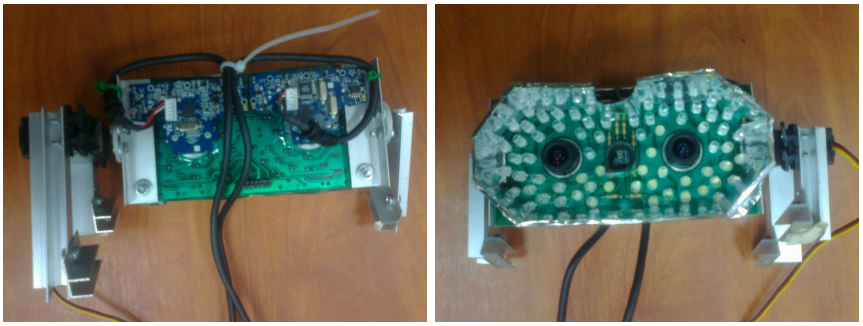


Figura 44: Módulo de visión delantero

soportes hechos de perfiles de aluminio de tal forma que se conforme una estructura expansible verticalmente (ver figura 46a), donde se apilan

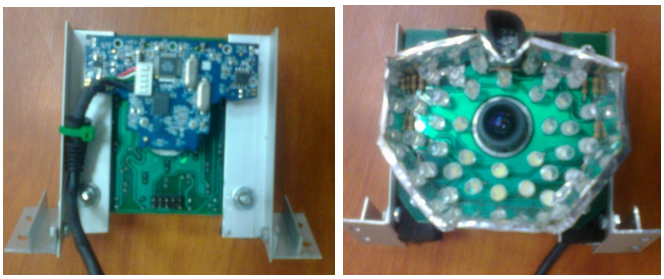


Figura 45: Módulo de visión trasero

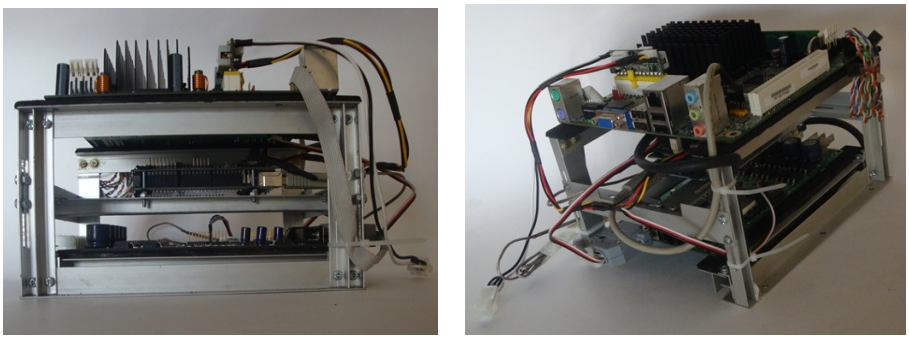
los circuitos uno encima de otro. En primer lugar se coloca el driver en el compartimiento inferior (ver figura 46b). Luego en el segundo piso se coloca el módulo daq (ver figura 46c), este compartimiento es móvil con el propósito de que se pueda hacer coincidir los ejes del robot con los ejes de los sensores, posee pernos y tornillos para asegurarlo una vez regulado. Finalmente en el compartimiento superior se coloca el computador central (ver figura 47), y se realizan todas las conexiones entre estos circuitos con los diferentes conectores tipo header, dsub15, usb, idc, terminal, jst, etc.

(a) Soporte vacío (b) Instalación del driver (c) Instalación de la daq

Figura 46: Ensamblaje del módulo principal

3.4 ENSAMBLAJE DEL ROBOT

Una vez fabricadas las partes mecánicas y electrónicas se continúa con el ensamblaje general del robot, el cual consiste en la instalación de los dispositivos en la carcasa y la interconexión entre los mismos. Como se puede ver en la figura 48 se comienza por el posicionamiento de los



(a) Vista lateral (b) Vista en perspectiva

Figura 47: Módulo principal de control

componentes de acuerdo al diseño. Teniendo en cuenta la distribución de los equipos se realiza lo siguiente:

- Por el lado derecho del robot se pasan los cables para poner en serie las baterías para los motores y luego de pasar por un interruptor termo-magnético llegan hasta los conectores del driver.
- Se pasan los cables desde la batería principal a través de un interruptor hasta la fuente de alimentación de la tarjeta principal.
- Se conectan los terminales de los motores hacia sus conectores correspondientes en el driver
- Se acoplan los encoder en la parte posterior de los motores y se sacan los cables de cada uno para unirlos en el conector rj45 que entra en el driver.
- Se pasan los cables usb de los módulos de visión hasta los conectores de la tarjeta principal y los cables planos hasta su conexión con el módulo daq.
- Se hace llegar el cable para la señal del servomotor del módulo de visión delantero desde el driver.

Todos estos cableados (ver figura 49) son asegurados con correas plásticas entre cables y amarrados a bases pegadas en la carcasa de tal forma que queden bien asegurados y no haya la posibilidad de despredimiento por las vibraciones que el robot tenga al funcionar.

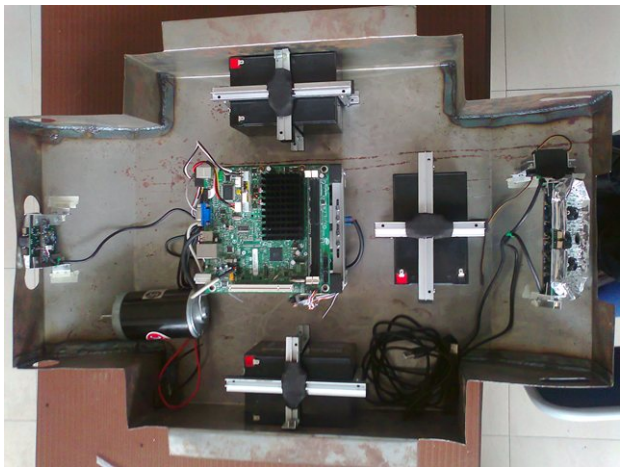


Figura 48: Posicionamiento de componentes

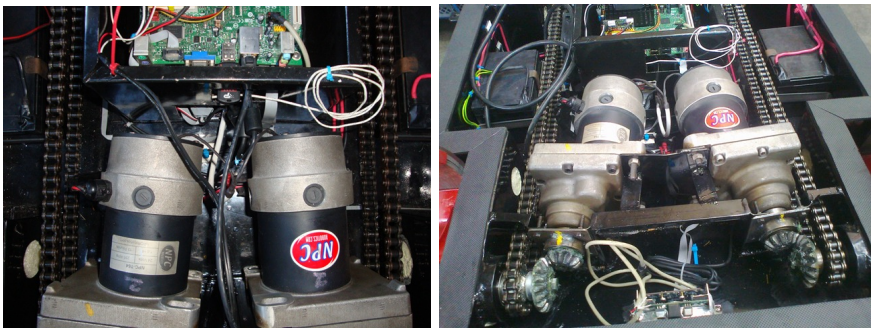


Figura 49: Cableado sección de potencia y motores

La colocación de los sensores de temperatura interna es muy importante por la aplicación que tiene el robot. Se sitúan 4 sensores en puntos estratégicos en cada sector del robot: delantero, trasero, izquierdo y derecho; como se puede ver en la figura 50.
Para mayor detalle sobre la distribución de los elementos dentro del robot y las conexiones entre estos referirse al esquema de conexiones mostrado en la figura 51.
Se pueden ver las imágenes en la figura 52 de como queda el robot móvil al final del ensamblaje, con todo su hardware en su puesto e interconectado; listo para realizar las pruebas de funcionamiento y control.

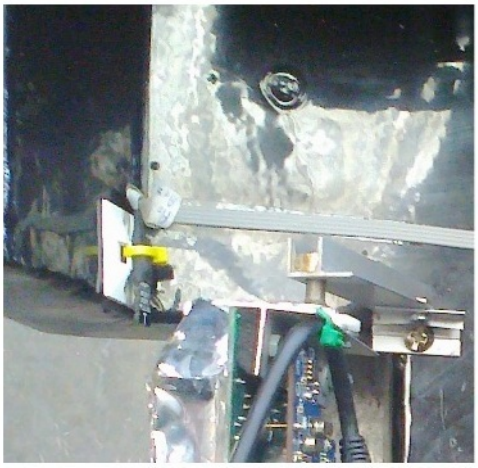


Figura 50: Colocación de sensor de temperatura

3.5 DISEÑO DE LA INTERFAZ HUMANO-MÁQUINA

La interfaz con el usuario distingue al mismo entre un usuario administrador técnico que se encarga del mantenimiento y análisis de desempeño del robot, y un usuario común encargado de manejar el robot para realizar las labores de campo. Para esto la interfaz provee al usuario con las siguientes herramientas visuales y táctiles:

3.5.1 *Visión remota*

Puede ser intercambiable entre visión en dos dimensiones (ver figura 53) o tres dimensiones (ver figura 54) según sea la preferencia del usuario. El robot puede transmitir imágenes tanto desde su cámara posterior o de sus dos cámaras delanteras, las cuales además poseen un servocontrol que permite tener un rango de visión de casi 180° en el plano vertical.

3.5.2 *Palanca de control*

Para dotar al usuario de una mejor experiencia al controlar al robot se incorpora a la interfaz el uso de una palanca o joystick (ver figura 55b); típicamente usado en juegos de vídeo. Mediante el envío de comandos basados en la posición de los ejes de la palanca, el usuario puede regular

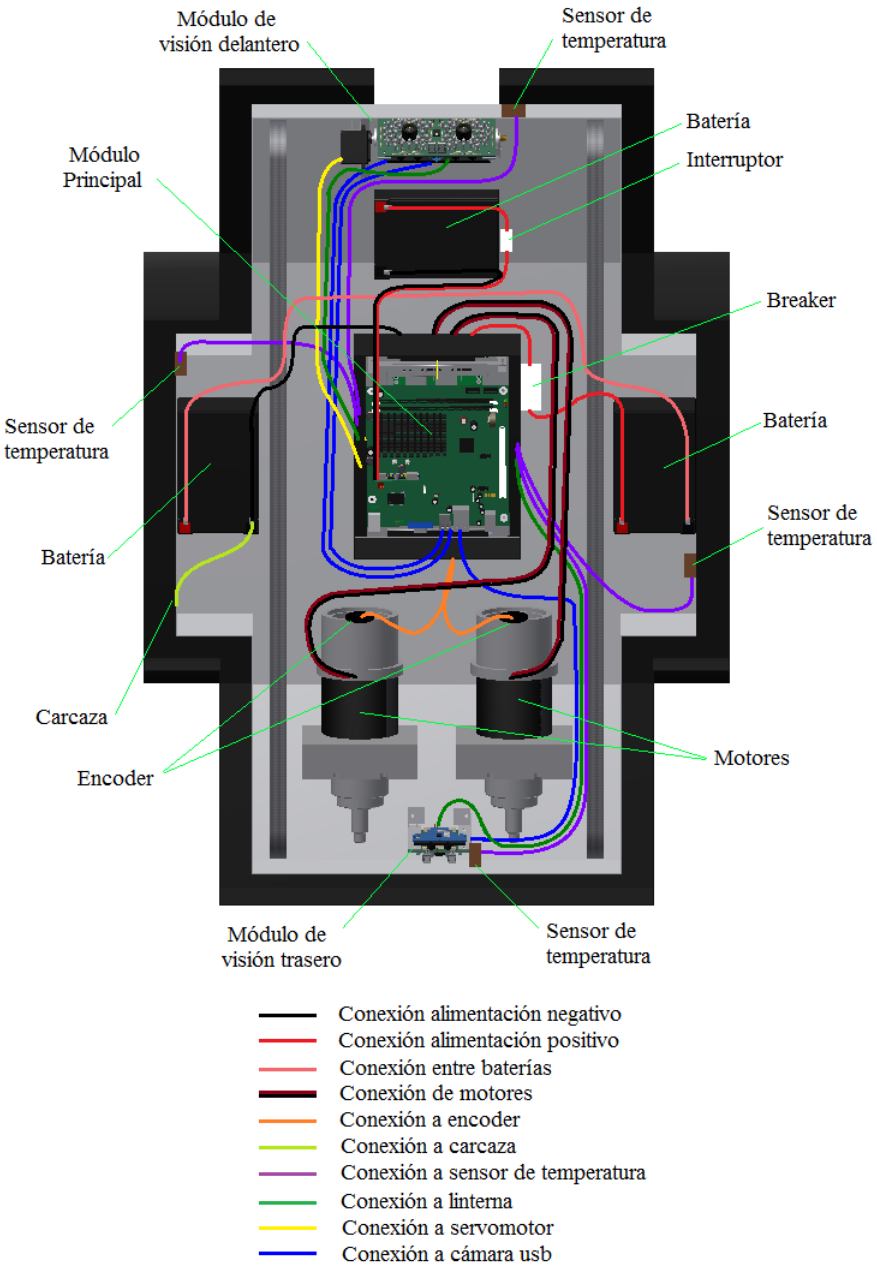


Figura 51: Esquema de conexiones

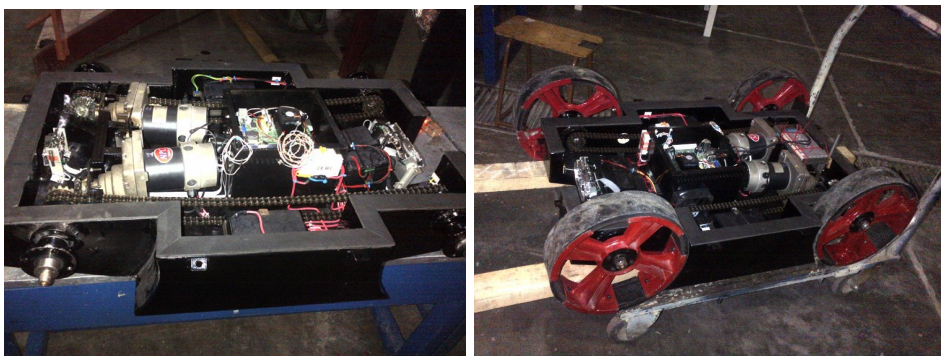


Figura 52: Robot móvil terminado

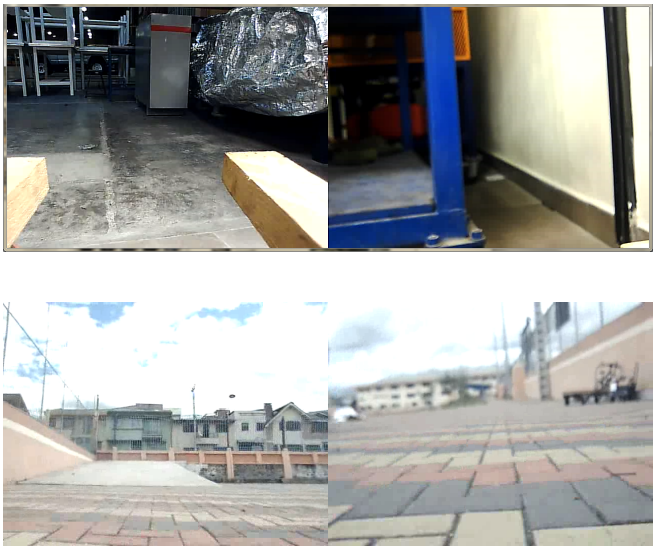


Figura 53: Visión en 2 dimensiones

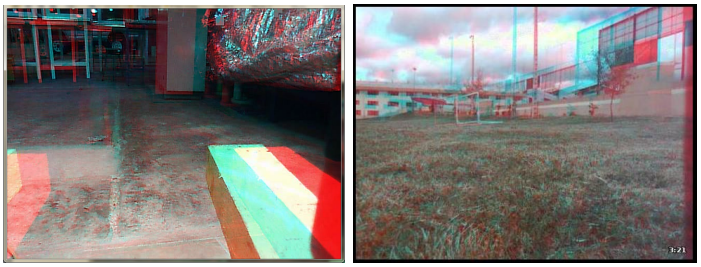


Figura 54: Visión en 3 dimensiones

tanto la velocidad como la dirección a la que se mueve el robot. Se utiliza un modo de canales mezclados, es decir que con la misma palanca se pueden comandar ambos motores para acelerar y girar como se indica en la figura 55a.

Commands Ch1	Commands Ch2	Motors Speed Mot1	Motors Speed Mot2
100% ▲	0%	Fast	Fast
0%	100% ◀	Fast	Fast
0%	0%	Stop	Stop
0%	50% ▶	Slow	Slow

(a) Modo de canales mezclados *(Fuente: Manual de usuario RoboteQ Ax3500)*

(b) Palanca de Control *(Fuente: www.geniusnet.com)*

Figura 55: Interfaz de control

Además posee un tercer eje para controlar la posición de las cámaras delanteras, y botones para accionar los periféricos como las linternas y cambiar el modo de funcionamiento. Por seguridad se implementa un botón de hombre muerto el cual se debe de mantener pulsado para que los motores se puedan accionar caso contrario el robot no responderá a ningún comando y no se moverá.

3.5.3 *Controles e indicadores virtuales*

Consisten en clases de objetos manipulables e indicadores. Estos se encuentran implementados mediante la plataforma labview (ver figura 56). Mediante el software desarrollado se pueden recibir los datos que el robot envía a través de la red para visualizarlos de la manera mas adecuada de acuerdo a lo que estos representan. Entre los diferentes indicadores se encuentran los siguientes:

- Controles tipo deslizante para ajuste de velocidad y dirección de motores, control de grado de iluminación de linternas, y servocontrol de cámaras.

- Botones para el accionamiento de hombre muerto, encendido y apagado de linternas, y cambio de modo de funcionamiento.
- Indicadores tipo termómetro para visualizar las temperaturas en los diferentes puntos internos y externos del robot, y las temperaturas internas de cada circuito, además la humedad del ambiente interno.
- Indicadores tipo relleno para monitorear los voltajes de las baterías y las velocidades de los motores.
- Indicadores tipo chart que registran los niveles de tensión y amperaje en los motores, y los valores de aceleración y razón de giro en los tres ejes relativos al robot.
- Leds que indican fallas, estado y modo de funcionamiento.

Estos indicadores se encuentran mas enfocados hacia el usuario administrador del robot. Con estos datos se puede saber como se desenvuelve el robot dentro de su entorno y el estado de sus circuitos internos, así como también se pueden detectar fallas para poder realizar mantenimiento.

3.5.4 *Administración del sistema*

El usuario administrador puede tener aún mas control sobre el sistema interno del robot ya que, con la ayuda del software servidor de escritorios remotos a través del protocolo VNC (conocido como "TightVNC" para linux), es capaz de ingresar remotamente al escritorio del computador incorporado. Además de poder intercambiar archivos con sistemas operativos windows o linux (mediante un servidor de nombres "Samba"), se pueden gestionar los dispositivos mediante los programas dedicados para estos como son: "Roborun" para la configuración del driver, "Arduino IDE" para la programación de la daq, y "Code Blocks" para programar y correr los programas principales de comunicación con el usuario y monitorear los mensajes de errores para realizar depuración.
Además se puede apagar y encender el sistema remotamente mediante el envío de mensajes wake-on-lan de tal forma que el sistema queda listo para ser usado al encenderse, es decir que todos los programas se encuentran corriendo esperando la conexión con el usuario.

Figura 56: Pantalla de control técnico

4

PRUEBAS Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explican las pruebas de funcionamiento del robot. Además de las pruebas finales del sistema, se desarrollaron pruebas parciales durante el proceso de construcción del robot, principalmente sobre el software de control. En primer lugar se detallan las pruebas de laboratorio que fueron realizadas en el taller, donde se tienen parámetros controlados y se puede verificar si los resultados son los correctos. Estas pruebas sirvieron tanto para depurar pequeños errores como para configurar y poner a punto todas las partes del sistema del robot para proceder a las pruebas de campo. A continuación se detallan las pruebas de campo que fueron realizadas en un ambiente para el cual fue diseñado el robot, donde se pusieron a prueba sus características en un entorno real. Estas pruebas sirvieron para determinar la funcionalidad final que ofrece el robot y para recopilar datos que indiquen el estado del robot durante su trabajo.

4.2 PRUEBAS DE LABORATORIO DEL ROBOT

Consisten de las pruebas realizadas dentro del taller donde se tienen parámetros definidos y situaciones controladas. Las pruebas realizadas son las siguientes:

4.2.1 *Pruebas de comunicación del software de control*

Se realizaron pruebas durante todo el proceso de desarrollo del software de comunicación e inteligencia del robot. Se buscaba asegurar las respuestas correctas frente a cada estado en que pueda encontrarse el robot, y de verificar la estabilidad y robustez del programa ante potenciales fallas; como pueden ser: desconexión o daños del hardware, retardos o pérdida de conexión con el usuario, deficiencia de procesamiento debido a falta

de memoria, ineficiencia programática, temperatura del hardware, etc. El objetivo de estas pruebas fue asegurar la conexión de los componentes internos del robot entre sí y con el usuario, y obtener la mayor velocidad y eficiencia en la transmisión de los datos; evitando que el programa se congele o sea terminado debido a sucesos no anticipados.
Entre las pruebas realizadas las mas importantes son:

1. Prueba de velocidad de conexión con el driver.- consistió en variar la velocidad entre intervalos de envió de comandos y consultas hacia el driver hasta obtener la mayor velocidad posible sin errores. Se probó con el valor de 20ms recomendado en el manual del driver obteniendo resultados de cero errores durante un tiempo indefinido. Se continuó bajando este valor a 18ms donde se obtuvo errores en la comunicación por lo que se terminaron las pruebas concluyendo que el valor óptimo es de 20ms.

2. Prueba de velocidad de conexión con la daq.- consistió en variar la velocidad entre intervalos de envió de comandos y consultas hacia la daq hasta obtener la mayor velocidad posible sin errores. Se iniciaron las pruebas desde intervalos de 10ms, este valor provocó que no se sincronice entre la consulta del dato y la recepción del dato. Se aumentó el tiempo a 16ms obteniendo datos erroneos solamente durante la consulta del valor de temperatura de termopar, lo que comprueba la irregularidad en el tiempo requerido para consultar una u otra variable. Se decide usar un tiempo de 20ms para consultar los valores de respuesta lenta y 16ms para los de respuesta rápida, de esta forma se logra obtener cero errores.

3. Prueba de certeza de conexión con el usuario.- el objetivo de esta prueba fue medir el retardo en la comunicación TCP/IP de tal forma que se pueda detectar una falla física de conexión, y así poder proceder a la suspensión general del movimiento del robot. El software de control envía y recibe datos del usuario a intervalos de 10ms, en caso de no recibir datos espera 20ms para una nueva consulta. En primer lugar se probó la comunicación por un medio cableado obteniendo una certeza del 100 % en la recepción de datos. Posteriormente se probó por un medio inalámbrico, aquí se obtuvo un porcentaje de error muy alto por lo que se probó aumentando el tiempo de re-consulta hasta llegar a un valor estable de 500ms.

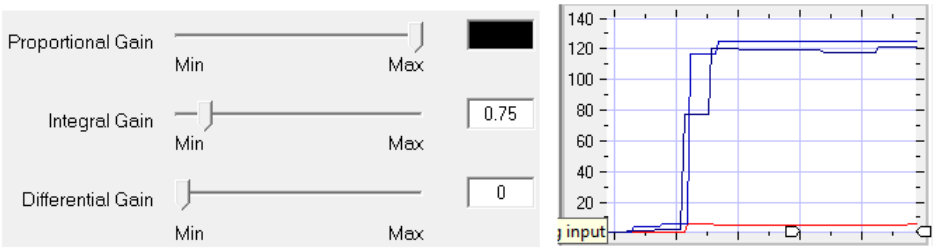
De aquí se concluye que la comunicación inalámbrica resulta muy poco confiable en comparación de una cableada.

4.2.2 *Pruebas y calibración del controlador de velocidad de los motores*

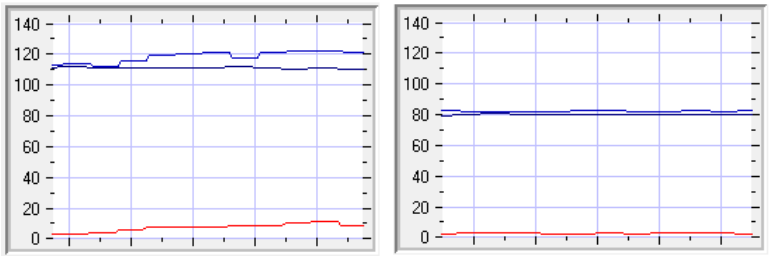
Existe mucha dificultad para determinar un modelo matemático preciso del sistema de locomoción de un robot, sobre todo si se tiene en cuenta que las características de la función de transferencia para la velocidad de un motor de corriente continua de imanes permanentes se comporta como un sistema tipo 1 de segundo orden [46] [44] [39], en el cual influencian varios parametros eléctricos y mecánicos como: potencia del motor, relación de la caja de engranajes, carga e inercia. Además, el comportamiento de un robot móvil es afectado por el entorno provocando cambios indeterminados en los parámetros de carga y fricción de lo que sería el modelo matemático. Debido a todo esto la sintonización de un controlador PID se vuelve un proceso manual a base de experimentación y pruebas.
Para las pruebas experimentales se debe conocer: que la ganancia proporcional influye positivamente en el tiempo de retardo y negativamente en el máximo sobresalto; que la ganancia diferencial influye en el tiempo de retardo y el máximo sobresalto; y por ultimo que la ganancia integral influye positivamente en el error de estado estacionario y negativamente en el tiempo de asentamiento. [44]
En el Manual del Controlador de Potencia AX3500 en la sección 10 [2] se indica el modo de control de velocidad en lazo cerrado, en donde se plantea los siguientes pasos para la sintonización del algoritmo de control PID implementado:

1. Se observa la respuesta del sistema en lazo cerrado con la ganancia proporcional en el valor máximo (ver figura 57a). Como se puede ver en la figura 57b el tiempo de retardo es muy pequeño pero existe un gran sobresalto, además existe un gran error de estado estacionario como se puede ver en la figura 57c.

2. Se aumenta paulatinamente la ganancia integral hasta llegar al máximo (ver figura 58a). Se puede observar en la figura 58b que la respuesta aún tiene sobresalto pero se puede notar en la figura 58c



(a) Valores de las constantes (b) Respuesta al escalón



(c) Respuesta sin carga (d) Respuesta con carga

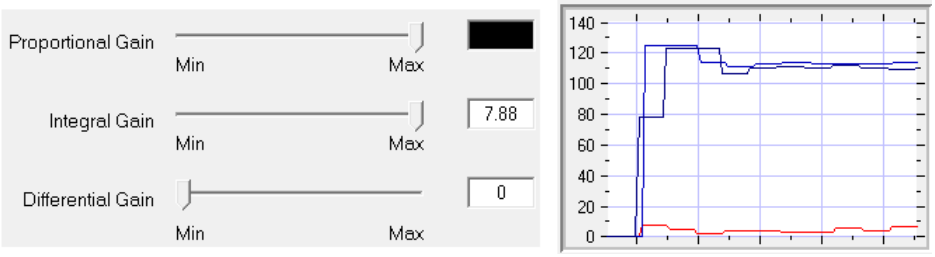
Figura 57: Configuración solo con constante P

que el error en estado estacionario disminuye. El error con carga se mantiene pequeño (ver figura 58d).

3. Se ajusta la ganancia diferencial hasta un valor óptimo (ver figura 59a). Se logra eliminar el sobresalto como se observa en la figura 59b, aunque se produce un aumento en el retardo. Sin embargo se observa en la figura 59c que el error en condiciones sin carga es casi totalmente eliminado y en condiciones con carga es mínimo como se ve en la figura 59d.

4.2.3 *Pruebas de los sistemas de visión*

El objetivo de estas pruebas fue comprobar el correcto funcionamiento de los módulos de visión, en cuanto a lo que tiene que ver transmisión de vídeo, control de iluminación y movilidad. Cabe recalcar que en las pruebas realizadas se busco resultados enfocados hacia el uso como interfaz con el usuario, mas no hacia el uso para visión artificial donde se requieren mayores grados de precisión.



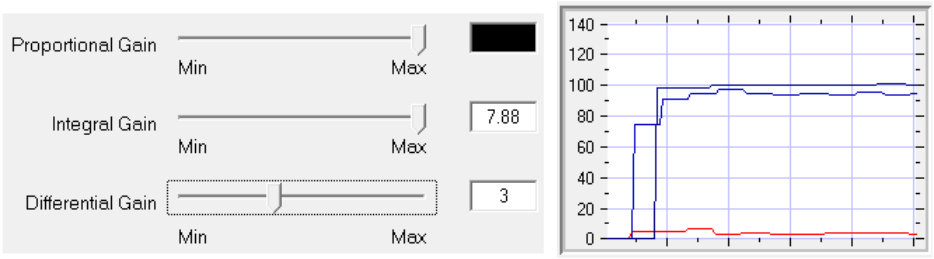
(a) Valores de las constantes (b) Respuesta al escalón

(c) Respuesta sin carga (d) Respuesta con carga

Figura 58: Configuración con constante P e I

Pruebas de transmisión de vídeo

Se realizaron pruebas para elegir el formato de compresión que permita transmitir el vídeo sin retardos usando la menor cantidad de recursos. En primer lugar se probó utilizando flujo de vídeo en vivo por *VLC* lo que resultó en retardos de transmisión de 30 segundos, por lo que quedó descartada la opción. Se probó usando el *API* del controlador de dispositivos *V4L2* directamente con flujo *RAW* mediante *OpenCV*, el resultado fue la reducción del retardo de transmisión a alrededor de 1 segundo; el retardo persiste debido a un alto ancho de banda que produce el flujo *RAW* de la cámara *PS3* al transmitir los fotogramas. Finalmente se probó utilizando el codec *mpeg* mediante *Gstreamer* resultando en un retardo mínimo de alrededor de 0.25 segundos. A pesar de poder disminuir el retardo no fue posible la transmisión de vídeo de tres cámaras simultáneamente debido a que cada proceso por cámara consume el 40 % de uso de procesador, lo que limita la funcionalidad a un máximo de 2 cámaras simultáneamente.



(a) Valores de las constantes (b) Respuesta al escalón

(c) Respuesta sin carga (d) Respuesta con carga

Figura 59: Configuración con constante P, I y D

Pruebas de control de iluminación

El objetivo del control de iluminación es activar las linternas de tal forma que se mantenga una iluminación óptima constante para las cámaras. Las pruebas realizadas pudieron comprobar que cuando la iluminación se encuentra por debajo de entre los 50 a 100 lux, se dificulta la vision en la interfaz de usuario. Esta falta de iluminación se compensa con las linternas LED de luz blanca (ver figura 60) provistas en los módulos de vision, las que se operaron de dos modos, manual y automático. Cuando se hizo uso de la compensación manual en la mayor parte de las ocasiones se optó por encender las linternas a su máxima intensidad lumínica, ya que para el operador resulta complicado realizar esta acción de manera rápida y precisa, notando de esta forma un consumo no adecuado de la energía proveniente de las baterías. Debido con lo anterior, se implementó un algoritmo de control automatico proporcional a la intensidad lumínica de las linternas, sintonizado de manera experimental de manera similar a la sección 4.2.2, además se estableció una referencia fija para el controlador de intensidad lumínica a 120 lux. Se evidenció que el consumo de energía de las baterías es mas eficiente, pero el controlador

presenta inestabilidades debido a que la medida de la cantidad de luz depende también del color y la distancia a la que se encuentran las superficies que se iluminan.

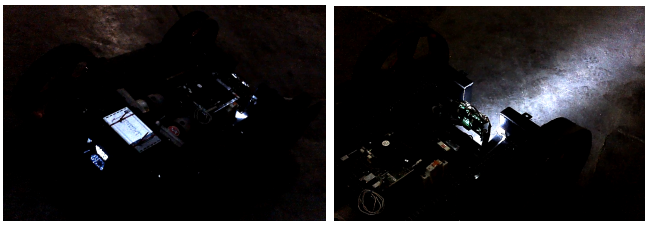


Figura 60: Prueba de accionamiento de linternas

Pruebas de movilidad del módulo de visión delantero

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento mecánico del módulo de visión delantero, y el efecto que produce la movilidad para la interfaz con el usuario, se realizaron las pruebas correspondientes. Como resultado se obtuvo que el módulo es capaz de moverse en un rango de casi 180° grados (ver figura 61), lo que quiere decir que el usuario es capaz de ver desde un punto directamente encima del robot hasta directamente al suelo por donde se desplaza. Se pudo notar también que el retardo en la comunicación produce a su vez un retardo de alrededor de 0.25 segundos en la respuesta del servomotor ante un comando del usuario, lo que produce un control no del todo fluido pero que no afecta en gran manera a la capacidad de reacción del usuario.

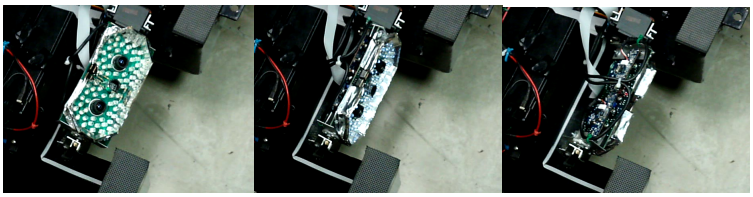


Figura 61: Movilidad módulo de visión delantera

4.3 PRUEBAS DE CAMPO DEL ROBOT

La pruebas de campo fueron realizadas en las inmediaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, en terrenos regulares como

cemento y adoquines, y en terrenos irregulares como tierra y césped. En total se realizaron 15 horas de pruebas durante las cuales se pudo comprobar el funcionamiento del robot en diferentes circunstancias de ambiente. Mediante el uso de una herramienta de software específico para la aplicación (ver figura 62) se recopilaron datos sobre el estado del robot durante su funcionamiento, como: aceleraciones, razón de giro, voltaje, amperaje, velocidad de motores, temperaturas internas y externa, humedad, iluminación y niveles de voltaje de las baterías. Se tomaron alrededor de 25000 muestras con un periodo de muestreo de 100ms programado, el cual debido a retardos en procesamiento de la tarjeta principal del robot y retardos en la recepión de los paquetes de datos, se aproximó hacia los 150ms.

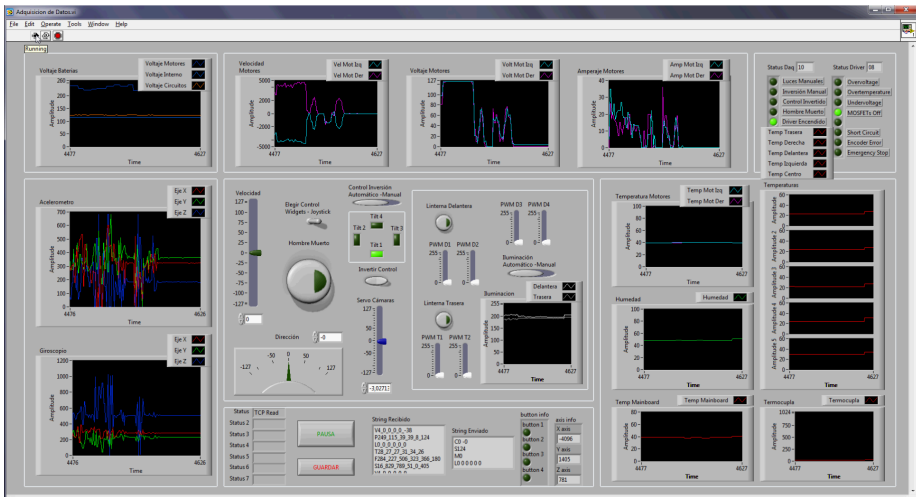


Figura 62: Pantalla de adquisición de datos

Estas pruebas se realizaron en un terreno con superficie de adoquines y cemento, se condujo al robot por varios senderos mediante el uso de la interfaz de visión remota. En primer lugar se probó la maniobrabilidad en un terreno plano y posteriormente sobre una pendiente, en la figura 63 se muestra al robot durante las pruebas realizadas. Durante cada periodo de prueba se pudo recopilar información que es analizada en los siguientes puntos.

(a) Perspectiva del robot

(b) Perspectiva exterior

Figura 63: Prueba de subida por una rampa

4.3.1 *Pruebas sobre terrenos regulares*

Prueba en terreno plano

El objetivo de esta prueba fue determinar el nivel de precisión del usuario al conducir al robot por un sendero. Se condujo al robot en línea recta y luego se giró a lo largo de una curva y en su propio eje.
En la figura 64 se muestran los resultados de la información de las velocidades de los motores y se compara con las curvas de razón de giro en los tres ejes. Analizando estos datos se puede ver que cuando se hace desplazar al robot se producen pequeñas aceleraciones en los tres ejes, lo que hace suponer que existen vibraciones que se producen cuando el robot rueda. Una razón muy probable para que suceda esto es la influencia de la forma de las ruedas, ya que estas no son totalmente redondas según el diseño mecánico establecido; además las vibraciones

pueden darse debido a imperfecciones en la construcción del robot como el acoplamiento de engranajes. Se puede notar en las curvas que al momento de girar el robot se producen picos muy grandes en las razón de giro en el eje z, pero estos se dan en intervalos muy cortos de tiempo, lo que lleva a concluir que se deben a que el robot no puede realizar un giro de manera fluida sino que debe enfrentarse a la fricción con el suelo.

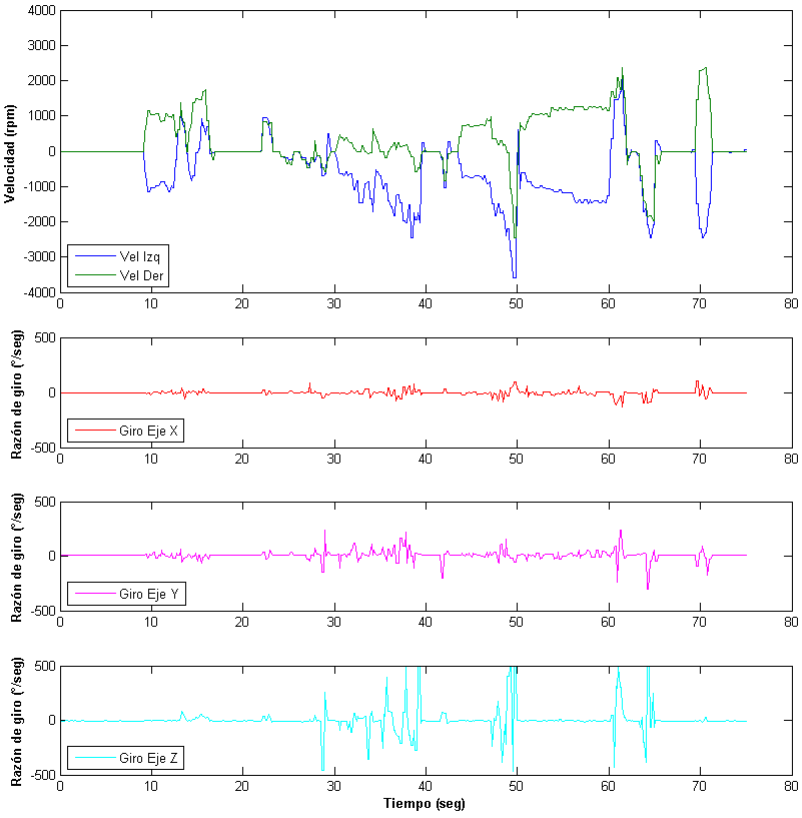


Figura 64: Curvas de datos de pruebas en terreno plano. Velocidades y razón de giro

En la figura 65 se muestran las curvas de datos del voltaje de la batería de motores y el amperaje que consume cada motor. Aquí se puede ver claramente que al accionarse los motores se produce un bajón en el voltaje de la batería que llega hasta 22 voltios en el peor de los casos, estos picos

se producen en relación con el amperaje exigido y son de menos amplitud cuando solo se acciona un motor. Se distingue también que en general el amperaje exigido por el motor derecho es menor que el izquierdo, lo cual refleja que la trayectoria seguida por el robot es una curva.

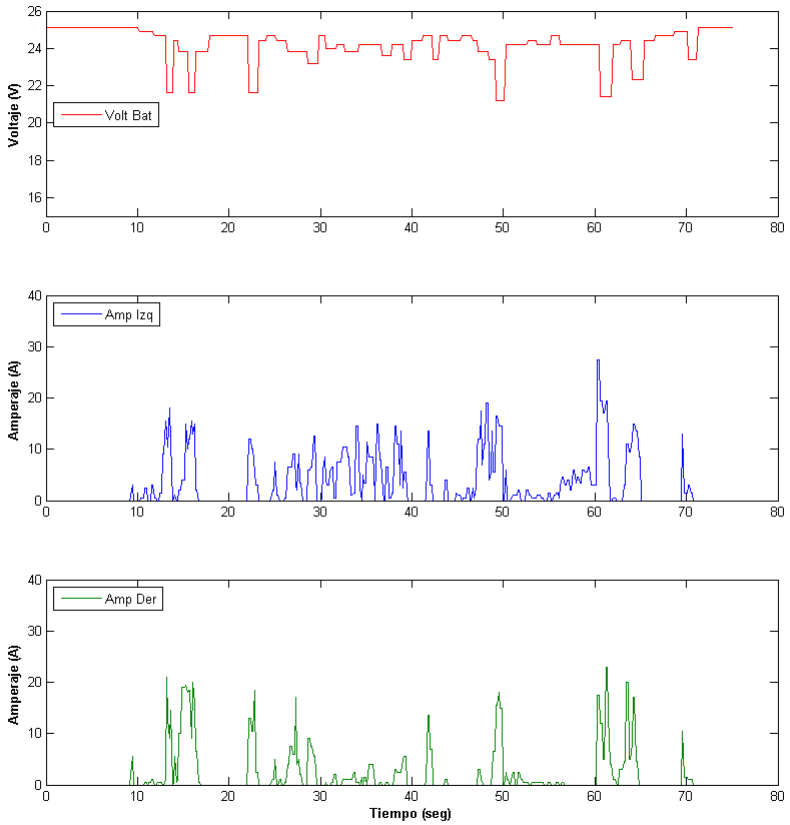


Figura 65: Curvas de datos de pruebas en terreno plano. Voltaje de batería y amperaje de motores

Prueba en una pendiente

Esta prueba consistió en conducir al robot a través de una pendiente de 30° con una superficie de cemento, primero se condujo en dirección de subida para luego bajar, y volver a subir nuevamente conduciendo

al robot hacia atrás. Esta prueba se realizó para medir la respuesta del sistema eléctrico y mecánico ante una situación de carga variante.
En la figura 66 se muestran los resultados de la información de las velocidades de los motores y se compara con las curvas de razón de giro en el eje X y aceleración en el eje Y. Aquí se puede notar la división entre los datos correspondientes a cuando el robot sube y cuando este baja. En los primeros datos sobresale el pico en la aceleración que se produce cuando el robot empieza a subir por la rampa y cambia su dirección verticalmente. Se evidencia principalmente en la aceleración en dirección Y el cambio de dirección vertical del robot, ya que cuando este sube se produce una aceleración negativa, y cuando baja se invierte la dirección de la aceleración debido a los efectos de la gravedad.
En la figura 67 se muestran las curvas de datos del voltaje de la batería de motores y el amperaje que consume cada motor. Al igual que la prueba en el plano se puede ver que existen bajones en el voltaje de la batería al accionarse los motores, el cual cae mayormente en los momentos en que el robot se encuentra subiendo y se estabiliza cuando el robot está parado. A pesar del aumento en las características de carga no se evidencia un aumento mayor en el consumo de amperios de los motores, pero si se nota la diferencia entre la primera vez en que el robot sube cautelosamente y la segunda vez en que sube velozmente. Y se nota mas claro aún la diferencia en consumo entre cuando el robot se encuentra bajando y cuando se encuentra subiendo.

Prueba de guiado sobre terrenos regulares

Con los datos obtenidos de velocidad angular de rotación de los motores, y que la relación de reducción de la caja es de 28 veces, se puede obtener la velocidad angular de rotación mediante la ecuación 4.1. Utilizando las librerías para *Simulink HEMERO* (ver figura 68b), podemos trazar la trayectoria deseada por el operario como se puede ver en la figura 68a. Para determinar la trayectoria obtenida se realizo un algoritmo en base a los datos obtenidos por los acelerometros, y para encontrar la posición del móvil se realiza la doble sumatoria de la aceleración como indica la ecuación 4.2. Dado que los sensores de aceleración son relativos, hacen que la medida de desplazamiento tenga un error acumulativo, para corregir este error se realiza la primera sumatoria que representa la

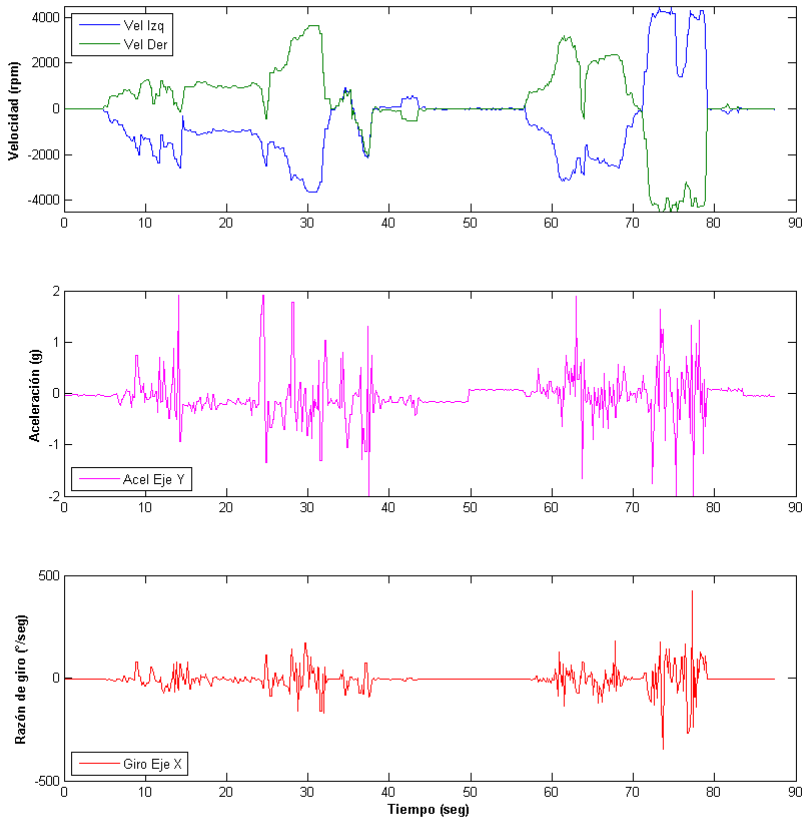


Figura 66: Curvas de datos de pruebas en una pendiente. Velocidades, razón de giro y aceleración

velocidad en intervalos finitos de k muestras y no usando las n muestras del total de la señal como indica la ecuación 4.3.

$$w[rad/s] = \frac{2\pi}{60 \cdot 28} \cdot w_m \tag{4.1}$$

donde w_m es la velocidad angular del motor en RPM,

$$e_{(x,y)} = \Delta T^2 \sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{n} A(n) \tag{4.2}$$

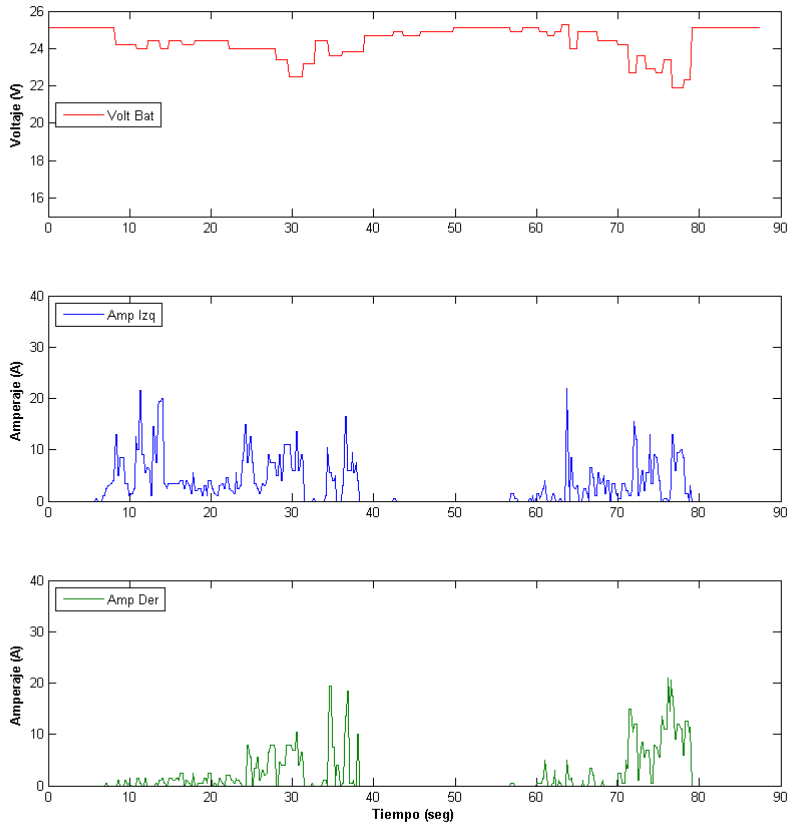
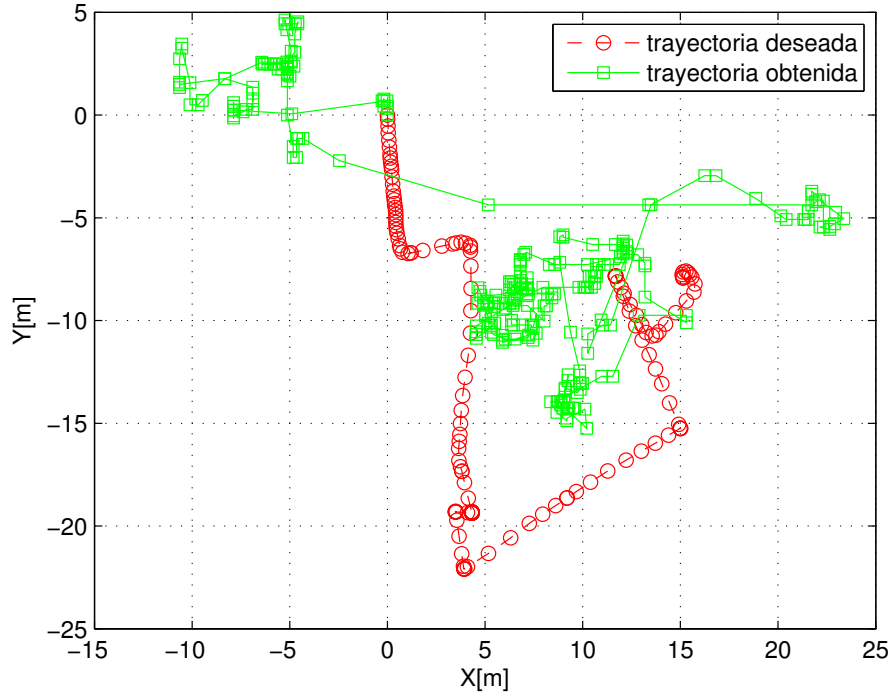


Figura 67: Curvas de datos de prueba en una pendiente. Voltaje de batería y amperaje

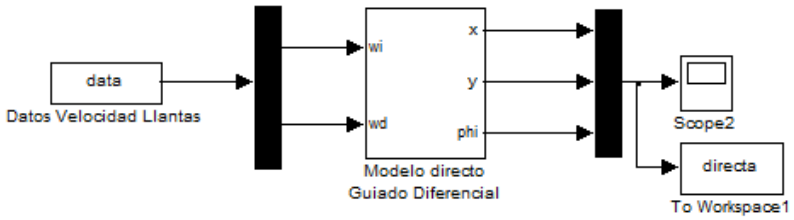
donde ΔT es el tiempo de muestreo y $A(n)$ es la enésima muestra de la aceleración.

$$v_{(x,y)} = \Delta T \sum_{i}^{i+k} A(n) \tag{4.3}$$

en donde i es la i-esima muestra de velocidad y k es el numero de muestras usadas para la estimación de la velocidad.
Se observa en la figura 68a que la trayectoria deseada y la obtenida se diferencian en gran manera, esto se debe a que los acelerometros se vieron influenciados por las vibraciones mecánicas producidas por los



(a) Posición del Robot

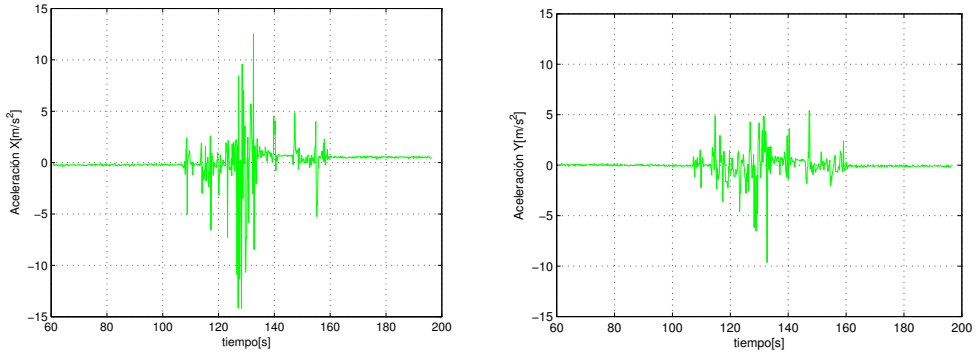


(b) Diagrama en Simulink

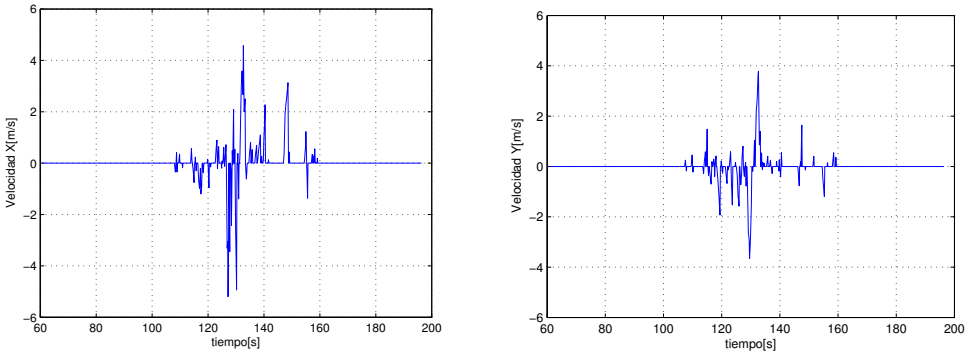
Figura 68: Trayectoria en terrenos regulares

engranajes de la transmisión mecánica y la forma de las llantas que no son totalmente circulares. Estas señales de interferencia son difíciles de eliminar con filtros ya que su espectro depende de cada una de las partes mecánicas en rotación y la velocidad a la que giran, sin embargo en la prueba como tal el operador pudo realizar la trayectoria deseada. En la figura 69a se observan las aceleraciones obtenidas de los acelerometros, y

en la figura 69b la velocidad obtenida a partir de las sumatoria respectiva, en donde también para eliminar el ruido en el nivel de aceleración se despreció todas las aceleraciones menores a $0{,}8 m/s^2$. En las figuras 69a y 69b se puede notar con mayor claridad el ruido producido por las partes mecánicas que dificulta la interpretación del movimiento del robot mostrado en la figura 68a (trayectoria obtenida).



(a) Aceleración en eje X y Y



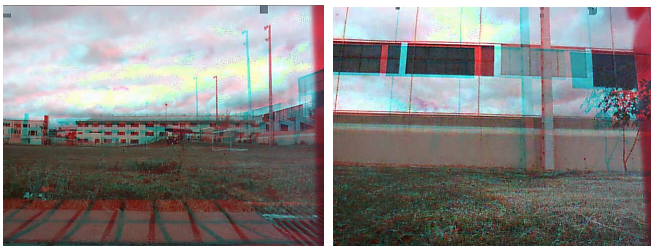
(b) Velocidad eje X y Y

Figura 69: Curvas de Datos en función del tiempo

4.3.2 *Pruebas sobre terrenos irregulares*

Se condujo al robot a través de un campo irregular de césped y tierra donde tuvo que enfrentase a irregularidades como subidas, huecos y obstáculos. El campo para estas pruebas se puede ver en la figura 70.

En primer lugar se realizó la transición entre un terreno regular a uno irregular, donde posteriormente se realizaron movimientos similares a las pruebas anteriores. El objetivo de esta prueba fue recopilar información para el análisis del estado del robot en circunstancias irregulares, para poder comparar además con lo obtenido en las pruebas anteriores.



(a) Perspectiva del robot

(b) Perspectiva exterior

Figura 70: Prueba en terreno irregular

En las figuras 71 y 72 se muestran las curvas de la velocidad de los motores comparado con las razones de giro en los tres ejes y las aceleraciones respectivamente. A simple vista se puede notar los efectos que producen las características del terreno en las curvas, donde se obtienen resultados mucho mas ruidosos que en las pruebas en terreno regular.
En la figura 73 se muestra el voltaje de la batería de motores y el consumo de amperios de cada motor. Se evidencia la mayor exigencia del terreno en la mayor amplitud general del amperaje de los motores, y en la caída de voltaje de la batería que esta vez llega hasta alrededor de 21V.

Prueba de guiado sobre terrenos irregulares

De igual forma que en la sección anterior se evalúa mediante la librería *HEMERO.* La trayectoria de descrita por el robot se muestra en la figura 74.

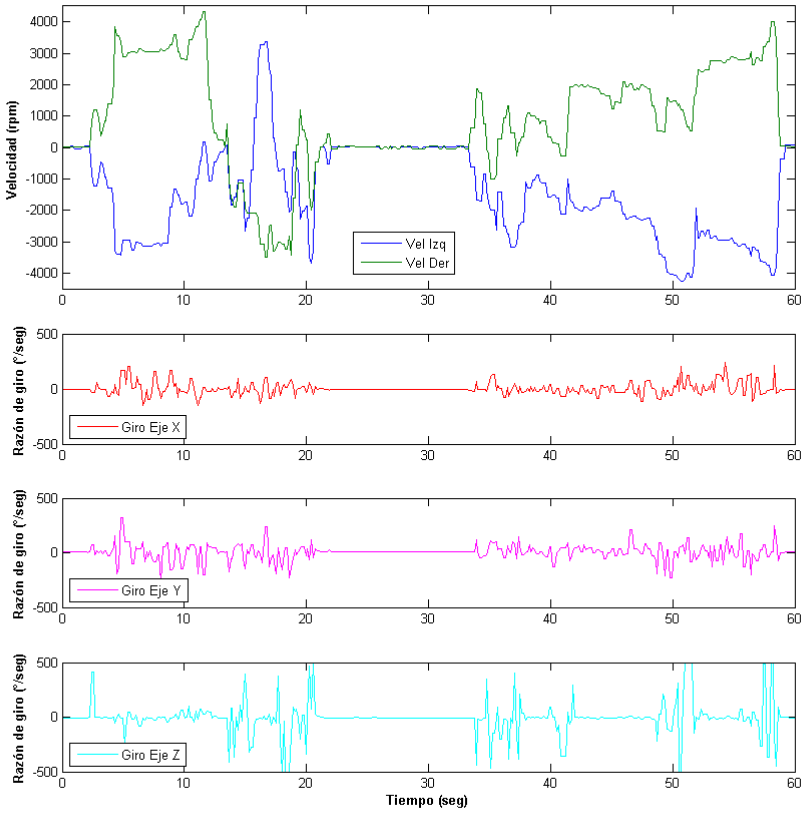


Figura 71: Curvas de datos de prueba sobre terreno irregular, Velocidades y razón de giro

En esta prueba a diferencia de la presentada en la sección anterior el ruido no es tan fuerte y se debe en parte a la amortiguación que ofrece el suelo al tratarse de césped, en la figura 74 se puede notar la tendencia entre la trayectoria deseada y la obtenida. En las figuras 75a y 75b se muestran las aceleraciones, velocidades medidas y evaluadas. En donde se puede observar que entre los 1240s y 1280s mayormente hay velocidad en el eje X por lo que en la figura 74 (trayectoria obtenida) existe un desplazamiento en el eje X, y desde los 1305s a los 1325s hay velocidad en el eje Y por lo que en la figura 74 se nota un desplazamiento en Y de mayor longitud que en X y esto se debe a que la velocidad en Y es

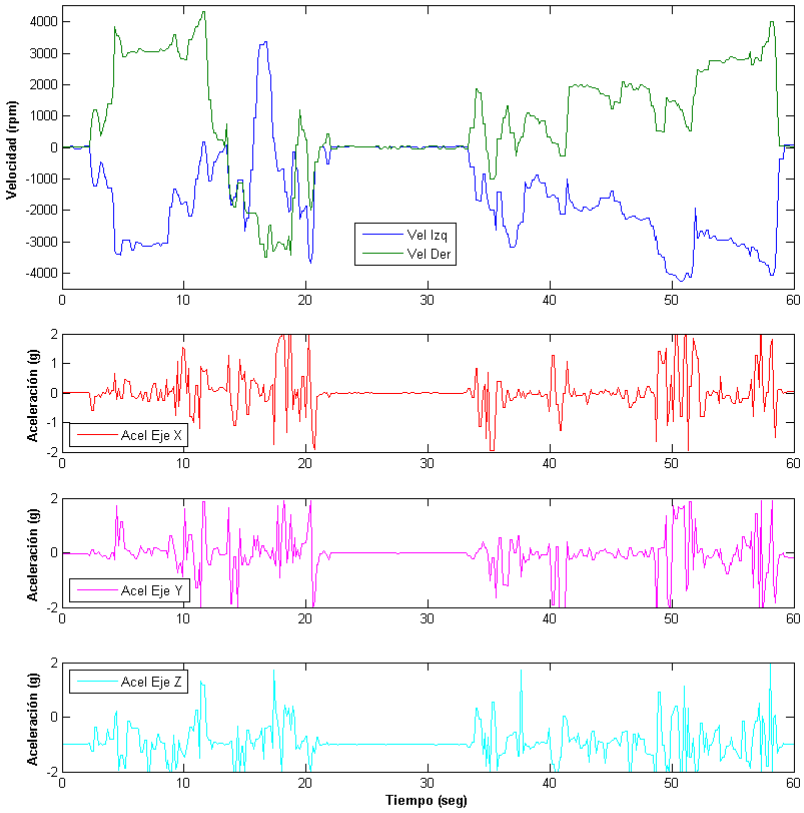


Figura 72: Curvas de datos de prueba sobre terreno irregular, Velocidades y aceleración

aproximadamente el doble de la velocidad en X en el instante entre 1240s y 1280s.

4.3.3 *Pruebas de resistencia a la temperatura*

Finalmente se procedió a realizar una prueba de temperatura para determinar la resistencia del robot hacia altas temperaturas del entorno. Se aplicaron en primera instancia ráfagas de fuego directamente a un costado del robot durante aproximadamente 15 minutos, y luego se dejó la fuente de calor por un tiempo de 20 minutos (ver figura 76). Al in-

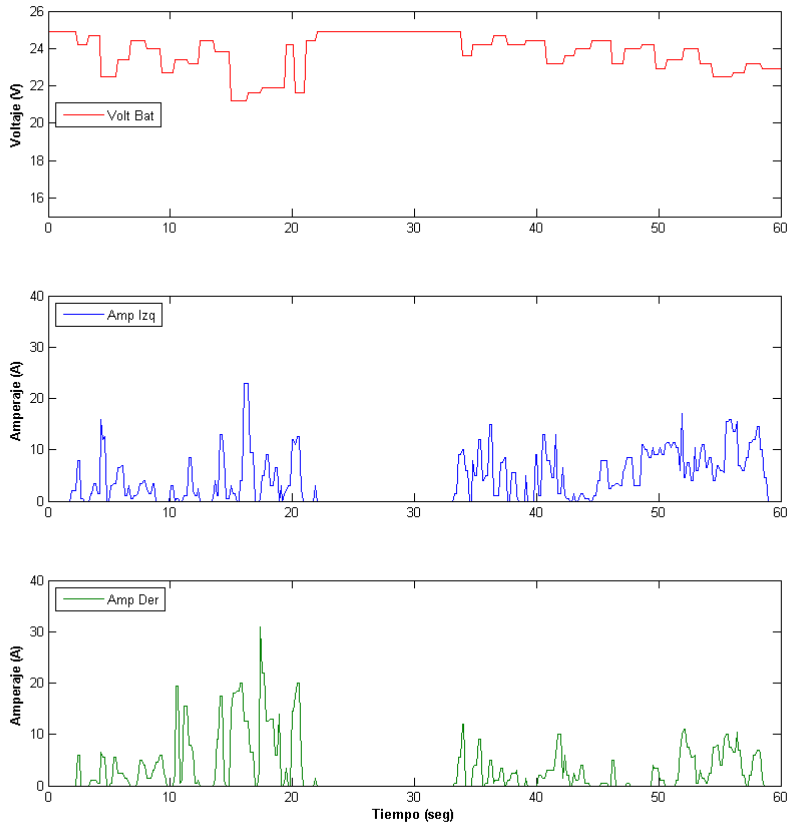


Figura 73: Curvas de datos de prueba en terreno irregular, Voltaje de batería y amperaje

speccionar la estructura del robot se determinó que no existían daños ya que la carcasa pudo rechazar la mayor parte del calor, sin embargo el calor se pudo filtrar por dentro aunque no en cantidad de comprometer el funcionamiento de los dispositivos interiores.
Los resultados de este experimento se pueden ver en la figura 77. En primer lugar se puede ver que la temperatura externa es de un promedio de 250°C aproximadamente con picos de 400°C, 600°C y 1000°C. Las temperaturas internas indican el efecto de la prueba, principalmente el sensor del costado izquierdo al cual se aplicaron las llamas. La temperatura en este costado llega hasta un tope de 60°C, y en el resto de lugares se

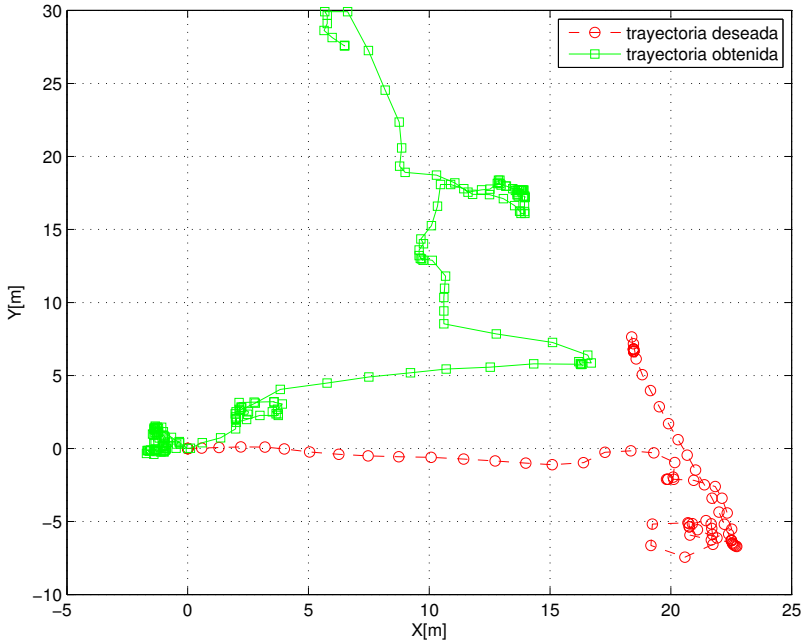
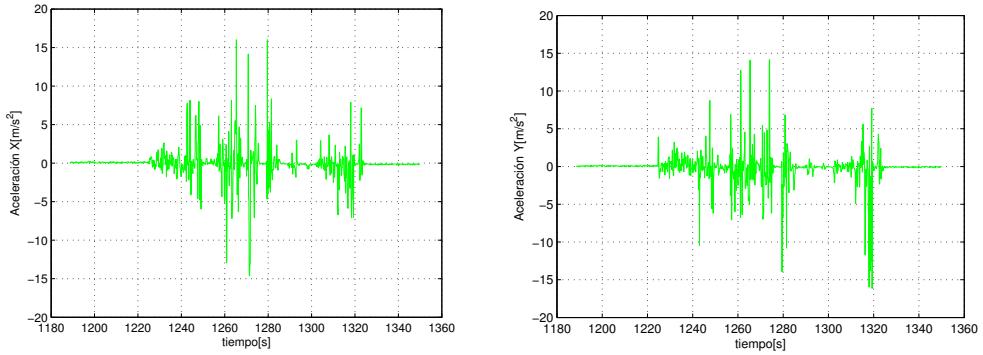
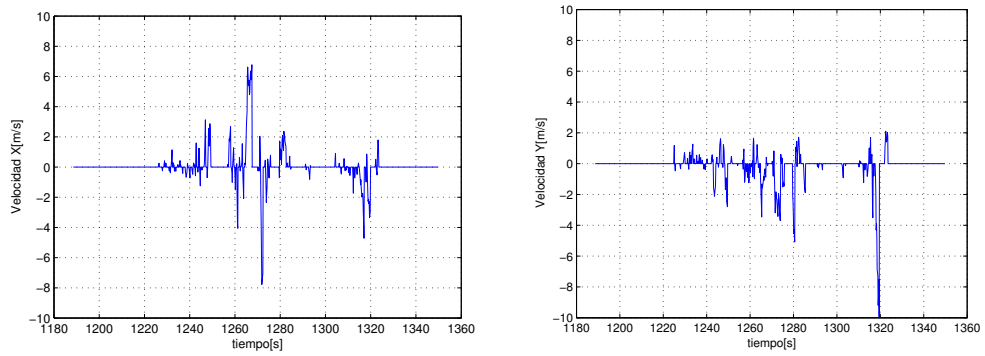


Figura 74: Trayectoria en terrenos irregulares

mantiene alrededor de 25°C; no se notan los efectos hasta unos 8 minutos despues de terminar de aplicar fuego, en donde aumentan alrededor de unos 2 o 3 °C. De igual manera se evidencia un ligero efecto en la temperatura en el resto de sitios en el interior del robot y en los circuitos de control. Finalmente se puede notar que la humedad en el interior del robot sufre un aumento durante la prueba.
En la figura 78 se muestra una comparación detallada entre la temperatura interior y la exterior, donde se puede notar la gran diferencia entre estas, lo que sirve de evidencia del exitoso funcionamiento del material aislante. Se puede notar que la temperatura interna no es inmediatamente influenciada por el calor externo, sino que existe un retardo de alrededor de 5 minutos. Debido a este motivo se tiene como resultado que la temperatura interior no llega a su tope sino hasta después de que se a cesado de aplicar calor en el exterior. En la parte final del experimento se hace más claro aún el efecto de retardo pero a la inversa, es decir, que por el mismo motivo por el cual el calor no puede entrar, a éste se le dificulta salir; al calor le toma aproximadamente 15 minutos para



(a) Aceleración eje X y Y



(b) Velocidad eje X y Y

Figura 75: Curvas de Datos en función del tiempo

Figura 76: Prueba con fuego

poder disiparse. Se puede concluir que el aislamiento cumple con su objetivo pero se producen efectos secundarios al no poder disipar el calor rápidamente hacia afuera del robot, lo que provoca la reducción en el tiempo de operación debido a la acumulación de temperatura que puede llegar a niveles peligrosos en periodos extendidos de uso.

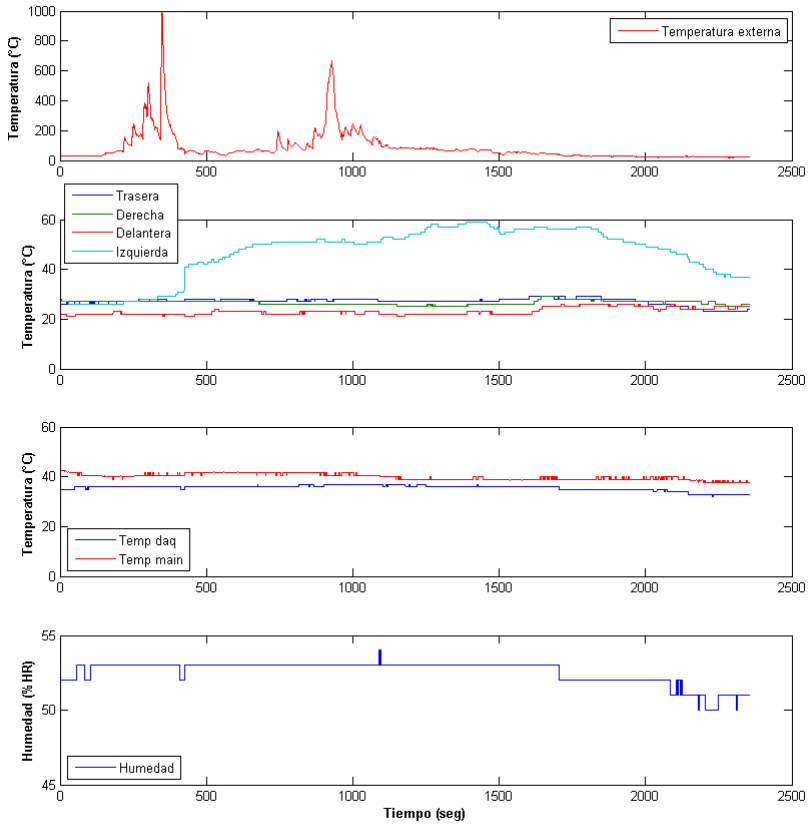


Figura 77: Curvas de datos de prueba de resistencia a la temperatura

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es de notar que las aceleraciones que se producen en todos los 6 ejes (x, y, z, gx, gy, gz) resultan bastante ruidosas y a veces con saturación. Esto puede ser ocasionado por las características del sistema de locomoción del robot como la irregularidad de las ruedas y el tipo de acoplamiento de los motores. Por otro lado se nota claramente la influencia de la gravedad en el caso de la aceleración en el eje, z y que la razón de giro en este mismo eje z es en general menos ruidosa que la de los otros ejes debido a que el robot trabaja en el plano XY la mayor parte del tiempo, pero que

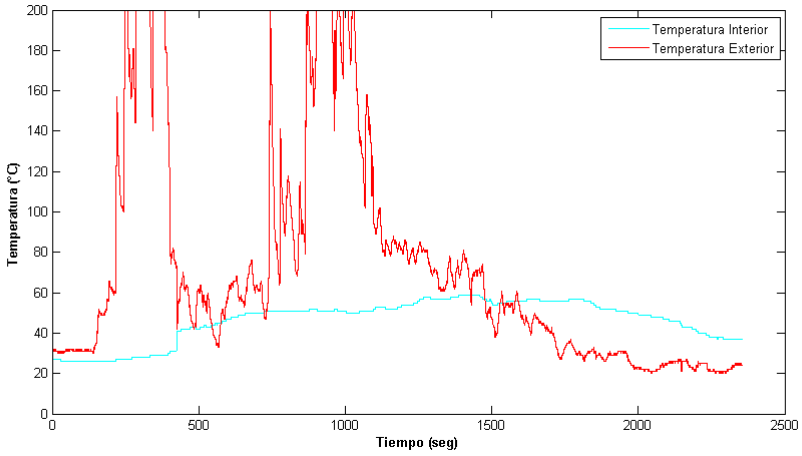


Figura 78: Temperaturas durante prueba de resistencia

se producen picos mas altos debido a la fricción y el esfuerzo que tiene que realizar el robot al momento de girar.
En lo que tiene que ver con la temperatura interna del robot, se recopilaron datos durante todo el periodo de pruebas, que se pueden ver en la figura 79. Las temperaturas aumentan paulatinamente, lo que hace respuesta a la disipación de calor que producen los componentes internos. Las temperaturas de los mosfet del driver caen cuando no están en uso hasta los 35°C y se estabilizan en 40°C cuando si lo están pero llegan hasta picos de 45°C cuando se los tiene funcionando un tiempo alargado. Las temperaturas del ambiente interno del robot son relativamente bajas, alrededor de 25°C durante todo el periodo de pruebas pero empiezan a crecer hacia el final debido al calentamiento de los motores y baterías, sin embargo no llegan a ser tan altas como para comprometer el funcionamiento. Las temperaturas en la tarjeta principal y la daq se mantienen con un promedio mas alto de 32°C y 40°C respectivamente, debido al mayor disipamiento de calor de los procesadores, de igual manera con periodos extendidos de funcionamiento su temperatura aumenta. La humedad sube también de un valor de 48 % hasta 53 %, por lo que se puede decir que tiene una relación directa con la temperatura.
Los niveles de voltaje de las baterías se muestran en la figura 80. El nivel de voltaje de la batería de motores tiene muchos picos de variación instantáneos de hasta 4 a 5 voltios, esto hace respuesta a la demanda de

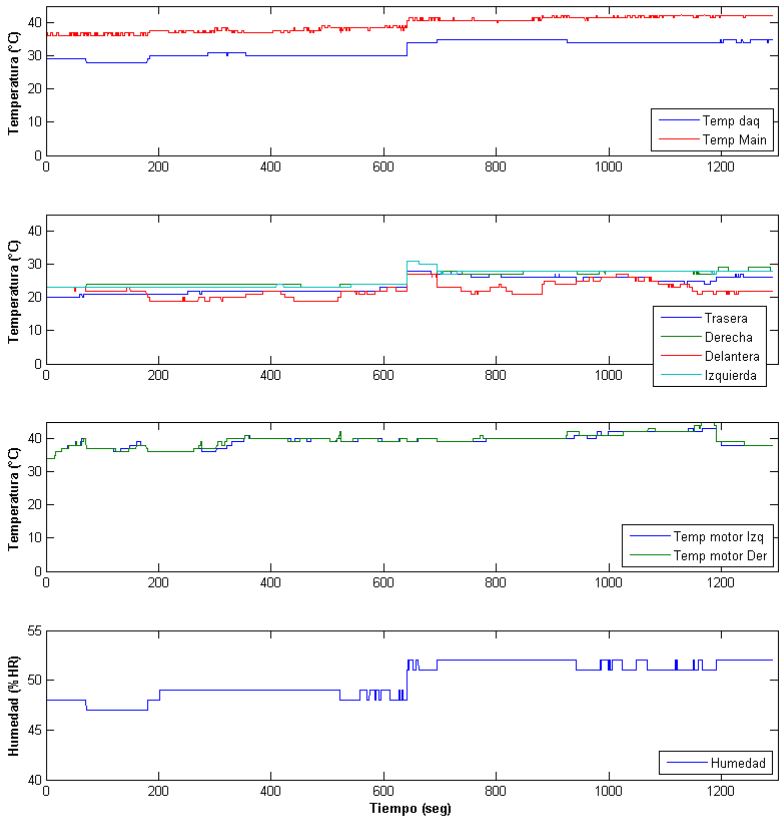


Figura 79: Temperaturas durante el periodo de pruebas

energía que tienen los motores al funcionar a veces con mucha carga; pero no se llega a niveles de voltaje demasiado bajos que comprometan el funcionamiento. A la medida que pasa el tiempo se aprecia el agotamiento de la energía, y de igual manera se aprecia el decaimiento del voltaje de la batería principal, el cual en un principio es mínimo pero en las instancias finales empieza a decaer rápidamente. Al término de las pruebas, después de 2 horas de funcionamiento contando el tiempo se preparación entre pruebas durante el cual no se tomaron muestras, el voltaje en la batería de motores cayó de 25V hasta 24V, y el voltaje de la batería principal cayó de 12.3V hasta 11.8V, lo que está bien dentro del rango de funcionamiento. Si se toma en cuenta la razón de decaimiento que se produjo, se puede

concluir que robot podría funcionar hasta un periodo de 4 horas con una carga completa inicial de sus baterías.

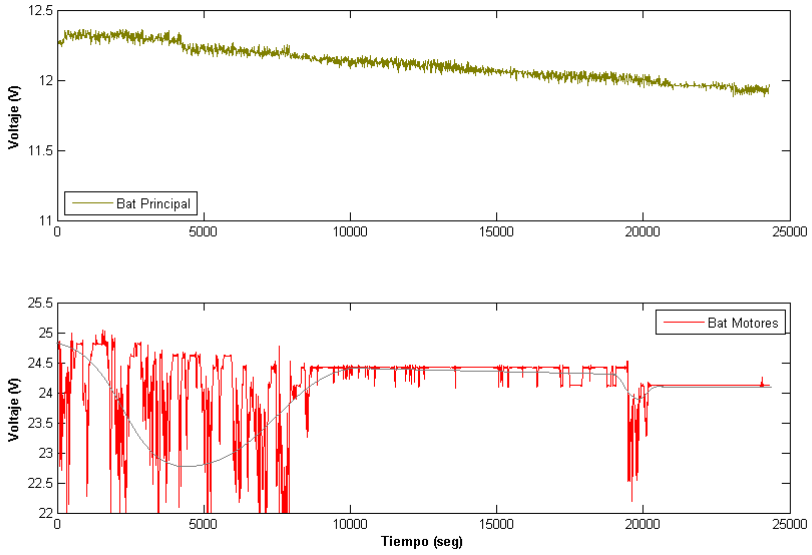


Figura 80: Niveles de voltaje durante las pruebas

5 RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el capítulo 1 se presentó una investigación teórica de lo que significa la robótica móvil. Se revisó la clasificación de los diferentes tipos de robots móviles que existen para ubicar al prototipo en cuestión dentro de la categoría de robots móviles terrestres. Posteriormente se proporcionaron datos y características de algunos prototipos que existen en la actualidad, de tal forma que se distinguieron las fortalezas y debilidades que estos hayan tenido para aplicar esos conocimientos en el robot. Se realizó un análisis teórico general de la estructura del sistema de un robot y de los diferentes componentes que lo conforman, entre los cuales se encuentran la interfaz humano máquina, medios de comunicación, sistema electrónico, fuente de energía, métodos de inteligencia y control, sistema mecánico, instrumentación. A continuación se describieron los conceptos de funcionamiento de los diferentes instrumentos que puede incorporar un robot tales como: cámaras, micrófonos, sensores. Y para concluir se revisaron los métodos de navegación y determinación de posición que generalmente se aplican en robótica móvil. Las conclusiones de este capítulo son:

- Realizar una ubicación previa de nuestro robot dentro de la clasificación de la robótica móvil nos ha permitido enfocarnos en crearlo de acuerdo a las necesidades específicas de la aplicación, ya sea en su forma de locomoción, grado de autonomía o medio en el que se desempeña. Se pudo aprender de proyectos similares realizados en otros lugares de los cuales se pudo emular ciertas tecnologías que han probado ser exitosas, y evitar otras que no resultan de gran aporte para la aplicación.

- Al hacer un análisis de las partes físicas y conceptos teóricos que conforman un robot móvil se pudo elaborar un diseño funcional inicial. Al investigar los diferentes tipos de tecnologías disponibles se obtuvieron las opciones para analizar durante el diseño, y se pudo identificar las partes que posiblemente requerirían una fabricación personalizada. Se pudieron analizar también métodos de

inteligencia y control comúnmente utilizados en robótica los cuales fueron el objetivo a desarrollar de este proyecto.

En el capítulo 2 se describió como se elaboró el diseño del robot. Se hace referencia en primer lugar los resultados de encuestas realizadas al personal del cuerpo de bomberos, con los cuales se pudo elaborar un diseño funcional y definir los parámetros y características que debe cumplir el robot. Luego se realizó un proceso de elección de las tecnologías a utilizar basándose en una metodología calificación y promedio de criterios de acuerdo a la aplicación concreta. En el siguiente punto se mostró un diagrama mas específico y se detallaron las características, y los cálculos para obtener estas características, de los dispositivos que conformarían el robot; entre los cuales se encuentran: cámaras, antena, procesador, motores, baterías, driver de motores, conjunto sensorial. A continuación se describió el diseño del sistema de control estableciendo por un lado la arquitectura física del mismo, y por otro lado la arquitectura del software; que comienza por la elección del sistema operativo puppy linux. Se describió a manera general los algoritmos utilizados, los protocolos de paquetes de datos, y se presentaron los diagramas de flujo del programa. A continuación se explicó el software de adquisición de datos implementado en la plataforma arduino y el software de adquisición y transmisión de vídeo. Se explicó las transmisiones a través de TCP/IP y se mostraron los diagramas de flujo de lo realizado con opencv y gstreamer. Para terminar se indicaron los diseños de los componentes realizados en inventor y se mostraron las imágenes de los mismos. Las conclusiones de este capítulo son:

- Las encuestas realizadas al personal del cuerpo de bomberos proporcionaron datos importantes de las características del medio y características técnicas que debería cumplir el robot, sí como requerimientos para la manipulación; todo desde el punto de vista del propio usuario objetivo para el cual debía estar diseñado el robot.

- Todos los equipos adquiridos para la implementación en el robot fueron escogidos mediante un análisis de ventajas y desventajas del tipo de tecnologías, y en base de cálculos matemáticos. Al hacer esto desde lo mas general hasta lo mas específico se logró llegar a un equilibrio entre las características de cada equipo, y cómo estos encajan dentro del sistema. Por supuesto al ser este un prototipo no

se descarta la posibilidad de hacer una segunda o hasta una tercera iteración de elección de los dispositivos para obtener un diseño mas eficiente y eficaz.

- Aunque existen alternativas para el sistema operativo mas específicas para un robot (como es el caso de ROS[1] montado en una versión reducida de UBUNTU), puppy linux resultó una elección muy buena. Gracias a una gran comunidad de desarrolladores que lo soportan, ha ofrecido facilidad para su instalación, alta velocidad en la ejecución de procesos e incluso la posibilidad de administrar y desarrollar remotamente. Se puede decir que el producto final de esta investigación ha logrado un aporte en el desarrollo de un sistema ROS montado en una plataforma puppy linux.

- El uso del lenguaje de programación C++ para el desarrollo de este proyecto ha resultado desafiante, sin embargo se ha demostrado que se pueden utilizar herramientas con licencia libre para desarrollar sistemas complejos de control y comunicación. El diseño queda abierto para futuras modificaciones y mejoras sin restricciones, además que estos conceptos puedan ser utilizados para otro tipo de aplicaciones.

- Se han detectado los siguientes problemas en la transmisión de vídeo sobre una red inalámbrica TCP/IP:

  1. OpenCV con V4L2 es muy ineficiente en la lectura del flujo RAW sin comprensión proveniente de la cámara PS3Eye.
  2. Con OpenCV bajo la tarjeta Intel D410 PT no se puede abrir mas de dos camaras al mismo tiempo.
  3. No se puede crear un flujo de camaras, diezmando los fotogramas por segundo originales provenientes de la cámara PS3Eye, no funciona el CODEC MGPEG.
  4. Tanto el CODEC FFmpeg de Gstreamer y el de OpenCV tienen problemas para abrir 3 camaras PS3Eye al mismo tiempo, pero si puede hacer esto con camaras WEB de menores prestaciones, el problema yace en el uso elevado del procesador y el ancho de banda que se genera en los puertos USB.

1 Pagina Oficial de ROS http://www.ros.org/ [7]

5. Si se comunica OpenCV y Gstreamer mediante el comando de sistema mkfifo la latencia generada es del orden de los 3 a 4 segundos.

- De acuerdo con las Paginas WEB de los manuales de los programas utilizados, referencias y guías de programación de Gstreamer, OpenCV y V4L2, PIPES, y LinuxMan existirían 4 formas de mejorar tanto la latencia, los fotogramas por segundo y la calidad de la imagen. Se puede plantear las siguientes soluciones a estos problemas:

  1. Generar flujo RTP o otro similar, con compatibilidad para OpenCV, sea esto mediante la integración de OpenCV con FFmpeg o Gstramer en Linux.
  2. Ya que con la GUI-X11 sink de Gstreamer la latencia es mínima, se debe generar por código un bin-source, para el sink ImImage, realizando una mezcla entre Gstreamer y OpenCV.
  3. Generar el PIPE {src, sink} código fuente para un nuevo modulo Gstreamer Anagliph-GUI.
  4. Actualizar Capture_Gstreamer para que OpenCV pueda abrir flujos multimedia de Gstreamer, o a su ves V4L2, para mejorar la eficiencia en latencia y numero de camaras al mismo tiempo.

- Al dejar implementado un sistema de adquisición de datos se dejan las herramientas para la implementación de teorías de control e inteligencia que puedan ser utilizadas en el robot para proporcionarle aún mas autonomía.

- Al momento la mejor opción para el flujo de vídeo es OpenCV ya que permite tener un Software propio dedicado, al cual se le puede ir mejorando la eficiencia, y agregando características con facilidad, además se puede realiar rutinas para encender o apagar el hardware utilizado (Camaras USB), de esta manera se puede ser eficiente en el uso de de la Energía de la Batería, que es un recurso limitado.

En el capítulo 3 se describió el proceso de construcción del robot. Primero se explicaron los pasos tomados para la construcción mecánica y se muestran imágenes referentes a esto. Se explicó la construcción del sistema

electrónico y de control mostrando de igual manera imágenes de las tarjetas electrónicas fabricadas y cómo estas conforman los diferentes módulos de hardware. Posteriormente se detallaron los pasos para ensamblar la electrónica dentro de la mecánica y se mostraron las imágenes correspondientes a la colocación de las tarjetas, sensores, módulos y la interconexión de los mismos. Al final se describió el diseño de la interfaz humano máquina explicando los detalles para los modos visión, modo y hardware de control, panel frontal e indicadores virtuales, y administración del sistema. Las conclusiones de este capítulo son:

- Un parámetro importante que se tomó en cuenta desde el inicio del diseño del prototipo ha sido el mantener el peso del robot lo mas bajo posible, esto le daría beneficios como la facilidad en el transporte del mismo, mayor funcionalidad en cuanto a resistencia a maltrato, tiempo de uso,etc., y menores costos de producción. Al terminar la construcción del robot se obtuvo un peso mucho mas alto, esto responde principalmente, entre algunos otros factores, a que los costos de los materiales requeridos para cumplir con las especificaciones requerías resultan demasiado altos. Lo cual ha ido mas allá de lo cubierto por esta investigación, existe entonces una gran dificultad en crear prototipos de estas características con bajos costos.

- Al dotar al robot de varios tipos de interfaz con el usuario se provee mayor flexibilidad en su uso. Teniendo en primer lugar la pantalla de control que proporciona todos los datos relevantes para su mantenimiento y la detección de fallas, y por otro lado una interfaz mucho más sencilla mediante el control a través de una palanca y la elección entre visión en dos o tres dimensiones. De esta forma se pueden tener dos tipos de usuarios, uno especializado en la administración del robot y otro que simplemente lo opera para que realice su labor; pudiendo este último ser cualquier persona con un mínimo de entrenamiento en el manejo del robot.

En el capítulo 4 se explicaron las pruebas de funcionamiento realizadas al termino de la construcción del robot, que básicamente se dividen en pruebas de laboratorio y pruebas de campo. Las primeras consisteron en la depuración del software de control, configuración o puesta a punto de los dispositivos, y confirmación de la correcta movilidad y accionamiento

de periféricos. Las pruebas de campo consistieron en conducir al robot a través de terrenos regulares e irregulares y recopilar datos del estado de su sistema interno. Se mostraron imágenes de lo acontecido en ambos tipos de pruebas, tanto desde una perspectiva externa como de la perspectiva del robot. Se indicaron las curvas de datos recopilados correspondientes a aceleraciones, voltaje, amperaje, velocidad, temperaturas, humedad, iluminación, nivel de batería, estos datos han servido para realizar un análisis respecto a los cambios de las variables físicas del robot a lo largo del tiempo. Las conclusiones de este capítulo son:

- Se ha tratado de producir un software de control y comunicación lo mas robusto posible, realizando primeramente un diseño con control de errores y luego comparando y corrigiendo con el comportamiento durante las pruebas de funcionamiento. A pesar de que el control resulta ser bastante estable la mayor parte del tiempo, se ha visto que se pueden dar ciertas inestabilidades que podrían ser corregidas con un futuro desarrollo basado en las experiencias de este proyecto. Una de las causas que ha provocado la inestabilidad es las desventajas que se tienen al desarrollar con herramientas de software libre, que ha pesar que existen grandes comunidades que las respaldan, existen errores e incompatibilidades que deben ser corregidos.

- En el análisis de las curvas de aceleración lineal y angular se constato que el robot estuvo expuesto un gran numero de vibraciones producidas por las partes mecánicas como motores, engranajes, transmisiones mecánicas, forma geométrica de las ruedas; además del tipo de terreno en donde la irregularidad ocasiona vibraciones en la estructura del robot. Se ve la necesidad de disponer de un sistema mecánico de amortiguación y suspensión, que permita minimizar estas vibraciones que actualmente comprometen la vida útil de los componentes mecánicos y ocasionan que los ajustes de tornillos y tuercas tiendan a ceder. Las curvas de corriente indicaron que cada uno de los motores se ve sometido a esfuerzos de forma aleatoria, se puede notar esto debido a que se observa picos en las señales de corriente que en caso de haber sido carga uniforme no estarían presentes. Se puede decir que este comportamiento se vio influenciado en parte por el diseño de la caja de engranajes que no

resultó ser del todo eficiente, dando un efecto de carga pulsante en los motores; además la variación de la fricción entre las ruedas y el suelo producen una carga no uniforme para los motores. Con las corrientes observadas se constata también el buen desempeño del manejador de potencia de los motores.

- La variación del voltaje en las baterías nos da información del nivel de carga de las mismas en función del tiempo. Observando la media de la razón de cambio del voltaje en las baterías, se puede predecir que la capacidad de energía que ofrecen las baterías limitan el uso del robot a aproximadamente 4 horas por su batería principal, y dependiendo de los movimientos del robot y terreno en el que se desplace, de 1 o 2 horas por su batería para los motores.

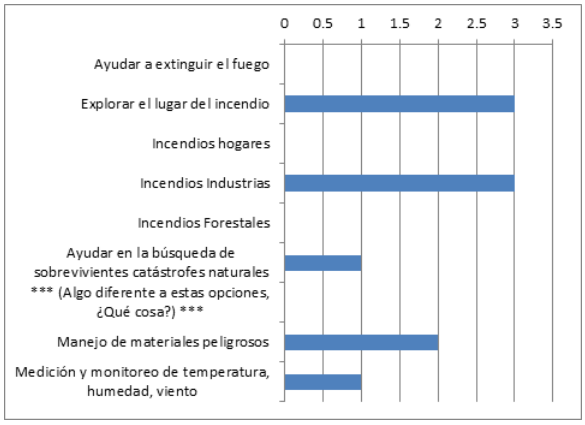
- Con las curvas de temperatura se evidencio que el prototipo puede funcionar en ambientes hostiles bajo altas temperaturas. Sin embargo sus protecciones tienen límites de tiempo, que se pueden evaluar realizando mas pruebas del robot en ambientes hostiles simulados; por lo que actualmente no sería recomendable utilizarlo por extendidos periodos de tiempo bajo estas condiciones. Además se tiene todavía inconvenientes para evacuar el calor almacenado en el robot, producto de la disipación de calor de los componentes electrónicos y partes mecánicas en rosamiento.

- Los datos recopilados de cada una de las variables físicas sirven de evidencia del buen desempeño promedio que tuvo el prototipo al ser operado por el usuario en diferentes entornos.

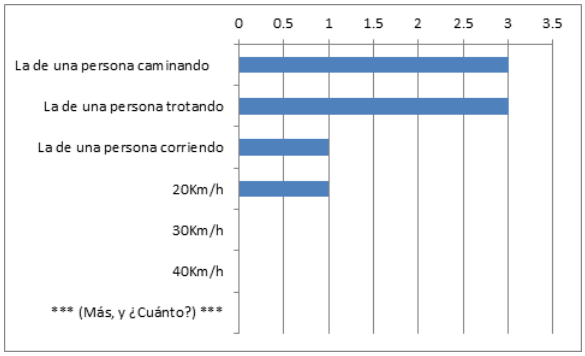
A

TABULACIONES RESULTANTES DE LAS ENCUESTAS

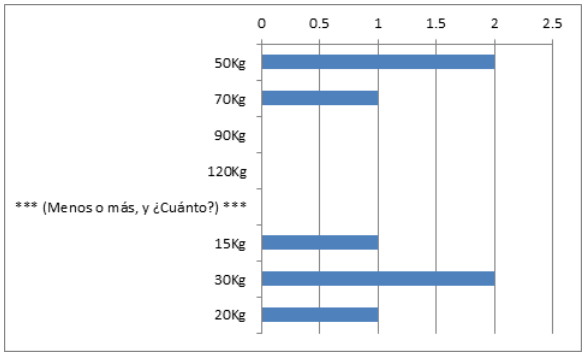
A.1 EL ROBOT DEBE SER DISEÑADO PARA:



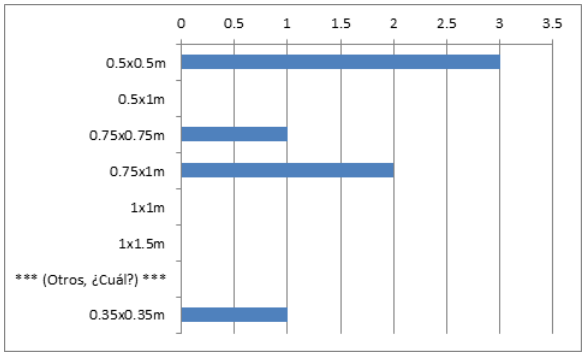
A.2 CUAL SERIA UNA VELOCIDAD OPTIMA PROMEDIO DE AVANCE DEL ROBOT:



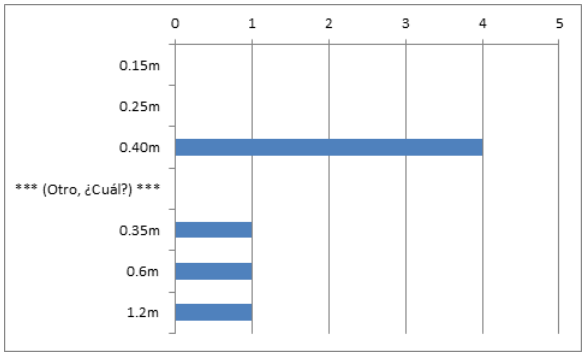
A.3 CUAL SERIA EL PESO OPTIMO DEL ROBOT:



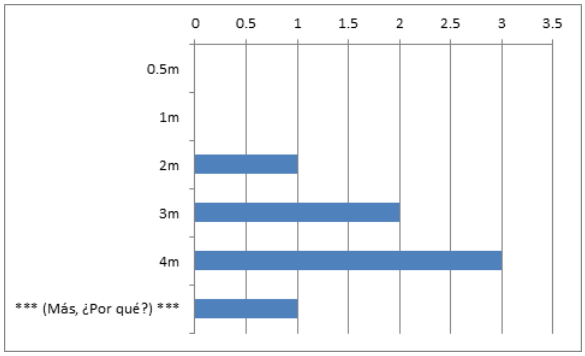
A.4 CUAL SERIA EL LARGO Y ANCHO OPTIMOS DEL ROBOT:



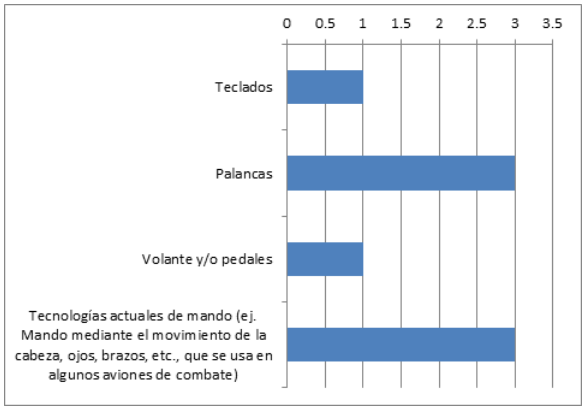
A.5 CUAL SERIA LA ALTURA OPTIMA DEL ROBOT:



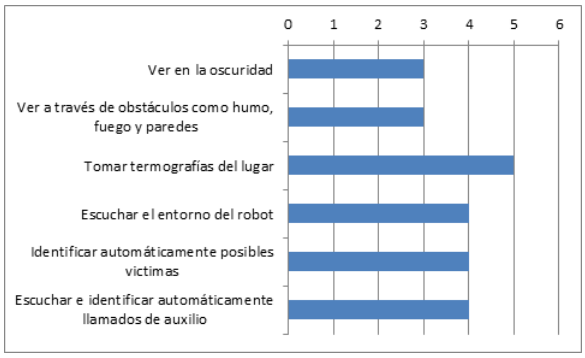
A.6 DEBE SER RESISTENTE A CAIDAS DIRECTAS DESDE:



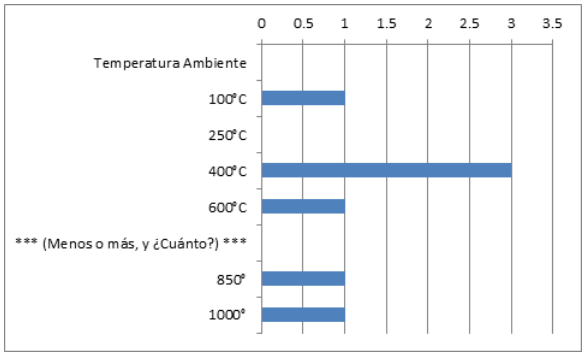
A.7 COMO LE GUSTARIA QUE SEA EL MANDO DEL ROBOT (INTERFAZ HUMANO MAQUINA), MEDIANTE:



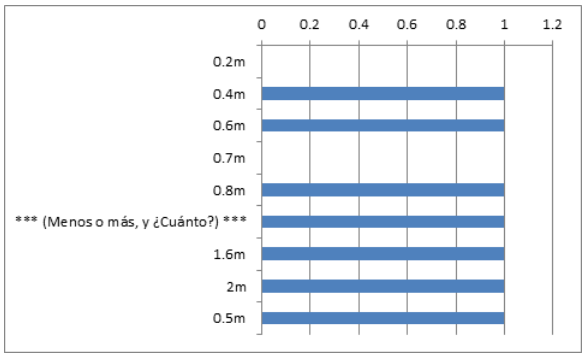
A.8 LA CAPACIDAD SENSORIAL DEL ROBOT DEBE HACERLO CAPAS DE:



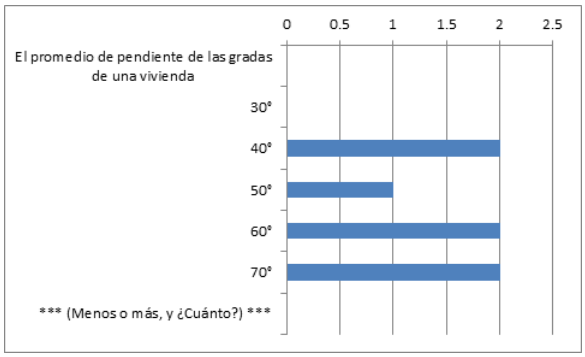
A.9 CUAL DEBERIA SER LA TEMPERATURA OPTIMA PROMEDIO QUE DEBE SOPORTAR EL ROBOT:



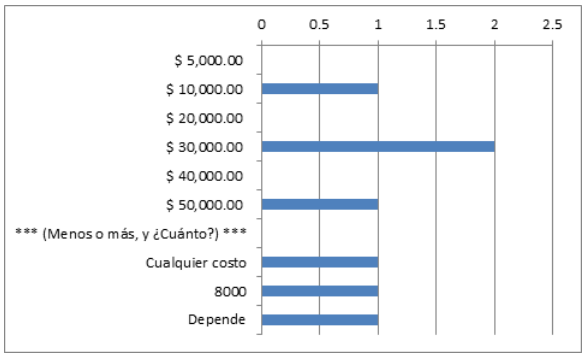
A.10 EL ROBOT ESTARA EXPUESTO A OBSTACULOS DE ALTURA MAXIMA DE:



A.11 EL ROBOT DEBERA SUBIR Y BAJAR PENDIENTES COMO:



A.12 COSTO QUE SE PODRIA PAGAR POR ESTE ROBOT DE AYUDA, TOMANDO EN CUENTA LO QUE SE CONTESTO ANTERIORMENTE:



B

CUADROS UTILIZADOS PARA LA ELECCION DE TECNOLOGIAS

B.1 CUADRO PARA ELECCION DE INTERFAZ CON EL USUARIO

Interfaz de Usuario											
		Característica									
	Tecnología	Intuición	Abstracción	Facilidad de uso	Estética y Ergonomía	Cantidad de Acciones	Tiempo de vida	Portabilidad	Costo	Tiempo de desarrollo	
1° Criterio	Teclado y Ratón	-5	-5	10	5	-10	10	8	10	4	
	Palanca y Joystick	7	5	10	9	7	10	8	5	2	
	Instrumentos Virtuales	5	8	9	-5	-2	8	8	10	-3	
	Lenguaje Corporal	-3	9	5	8	8	10	10	-10	-10	
	Señales Corporales	10	9	8	8	10	10	5	-10	-10	
2° Criterio	Teclado y Ratón	-2	-5	-3	5	0	8	6	9	10	
	Palanca y Joystick	6	8	6	8	10	-4	9	7	5	
	Instrumentos Virtuales	0	7	-7	10	10	10	10	0	-8	
	Lenguaje Corporal	7	10	3	-4	2	10	-3	-5	-8	
	Señales Corporales	8	10	-8	10	10	-5	-5	-9	-10	
											Total
Criterio Total	Teclado y Ratón	-3.5	-5	3.5	5	-5	9	7	9.5	7	**27.5**
	Palanca y Joystick	6.5	6.5	8	8.5	8.5	3	8.5	6	3.5	**59**
	Instrumentos Virtuales	2.5	7.5	1	2.5	4	9	9	5	-5.5	**35**
	Lenguaje Corporal	2	9.5	4	2	5	10	3.5	-7.5	-9	**19.5**
	Señales Corporales	9	9.5	0	9	10	2.5	0	-9.5	-10	**20.5**

B.2 CUADRO PARA ELECCION DE TECNOLOGIA VISION Y AUDICION

Visión y Audición										
		Característica								
	Tecnología	Volumen Requerido	Desarrollo de la tecnología	Iluminación	Campo de vista	Flexibilidad de características de visión	Transmisión de la señal	Costo	Tiempo de Desarrollo	
1° Criterio	USB	10	5	-2	4	2	5	10	-2	
	FireWire	2	5	-2	10	6	4	-2	-2	
	IP	2	3	-2	4	2	10	-2	6	
	Analógico	1	10	8	10	10	4	8	8	
	Analógico + IP	1	8	8	10	10	10	7	6	
2° Criterio	USB	10	-3	-8	-5	-8	7	10	10	
	FireWire	10	10	8	-5	0	-5	-9	-5	
	IP	-7	-5	5	5	0	10	-3	8	
	Analógico	-5	0	10	8	10	-10	5	-5	
	Analógico + IP	-10	10	10	8	10	10	-5	0	
										Total
Criterio Total	USB	10	1	-5	-0.5	-3	6	10	4	**22.5**
	FireWire	6	7.5	3	2.5	3	-0.5	-5.5	-3.5	**12.5**
	IP	-2.5	-1	1.5	4.5	1	10	-2.5	7	**18**
	Analógico	-2	5	9	9	10	-3	6.5	1.5	**36**
	Analógico + IP	-4.5	9	9	9	10	10	1	3	**46.5**

B.3 CUADRO PARA ELECCION DEL SISTEMA DE PROCESAMIENTO

Sistema de Procesamiento													
		Característica											
	Tecnología	Velocidad de Procesamiento	Recursos	Método de Programación	Procesamiento en tiempo real	Especialización	Flexibilidad	Consumo de Energía	Temperatura de Funcionamiento	Ambiente de funcionamiento	Costo	Tiempo de Desarrollo	
1° Criterio	Microcontrolador	-2	2	1	5	5	-5	4	10	3	5	-9	
	FPGA	10	-10	0	10	3	2	9	10	6	3	-10	
	DSP	3	2	3	8	6	5	7	5	6	5	-5	
	Sistema Microprocesado	10	7	8	6	8	9	7	5	6	8	6	
2° Criterio	Microcontrolador	-8	6	0	-8	10	-6	9	10	0	10	8	
	FPGA	10	-8	-3	10	5	5	7	10	0	-2	-7	
	DSP	5	-8	10	0	0	0	-1	10	0	2	-5	
	Sistema Microprocesado	9	10	9	2	8	10	-4	8	0	-6	5	
													Total
Criterio Total	Microcontrolador	-5	4	0.5	-1.5	7.5	-5.5	6.5	10	1.5	7.5	-0.5	**25**
	FPGA	10	-9	-1.5	10	4	3.5	8	10	3	0.5	-8.5	**30**
	DSP	4	-3	6.5	4	3	2.5	3	7.5	3	3.5	-5	**29**
	Sistema Microprocesado	9.5	8.5	8.5	4	8	9.5	1.5	6.5	3	1	5.5	**65.5**

B.4 CUADRO PARA ELECCION CIRCUITOS DE COMUNICACION

Comunicaciones									
		Característica							
	Tecnología	Frecuencia de Trabajo	Conexión a Internet	Transmisión de la señal	Flexibilidad	Facilidad de Conexión	Costo	Tiempo de Desarrollo	
1° Criterio	WiFi	10	10	7	10	10	8	1	
	Wimax	-5	10	9	10	5	-3	0	
	4G	-10	10	10	10	3	-9	-10	
	MotoWi4	-10	-10	10	-5	-5	-10	-5	
2° Criterio	WiFi	10	10	-4	10	10	9	10	
	Wimax	0	10	8	10	0	-6	5	
	4G	-6	8	10	10	-5	-2	0	
	MotoWi4	-10	-5	7	-8	-8	-9	-7	
									Total
Criterio Total	WiFi	10	10	1.5	10	10	8.5	5.5	**55.5**
	Wimax	-2.5	10	8.5	10	2.5	-4.5	2.5	**26.5**
	4G	-8	9	10	10	-1	-5.5	-5	**9.5**
	MotoWi4	-10	-7.5	8.5	-6.5	-6.5	-9.5	-6	**-37.5**

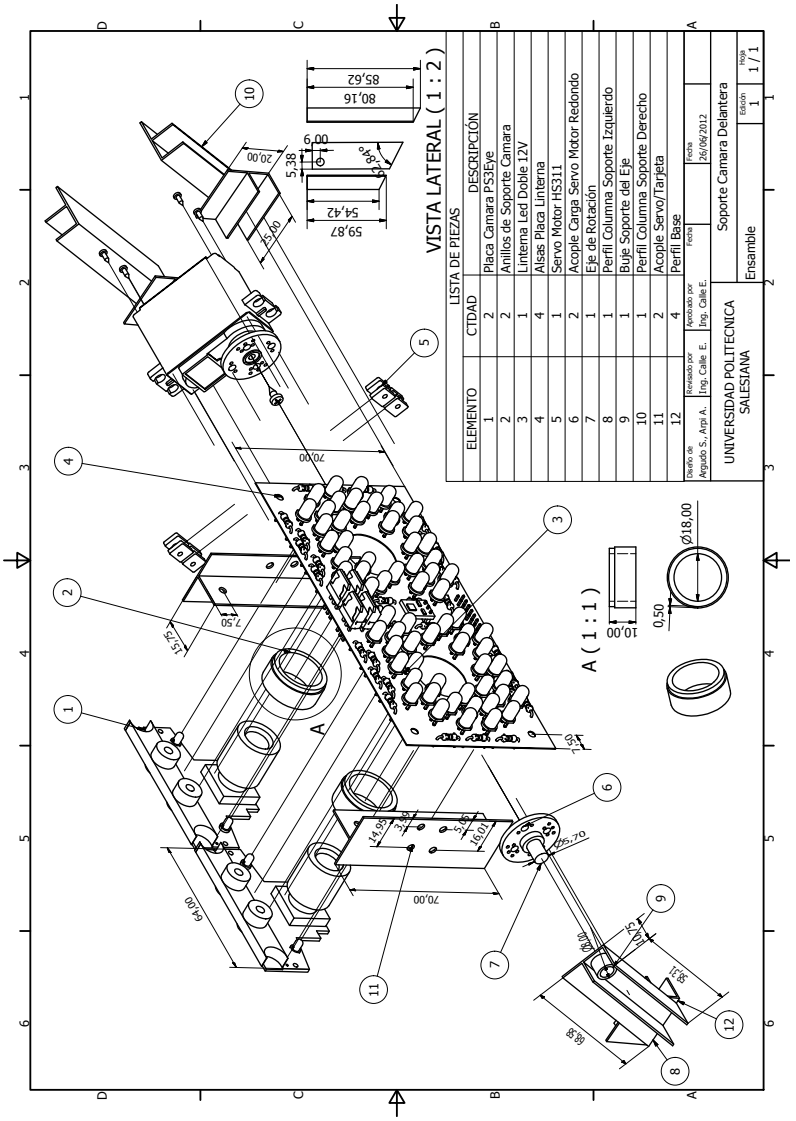
B.5 CUADRO PARA ELECCION ACTUADORES Y SU FUENTE DE ENERGIA

Actuadores y su fuente de energía										
		Característica								
	Tecnología	Relación Espacio/ Potencia	Relación Peso/ Potencia	Eficiencia	Potabilidad	Duración	Controlabilidad	Costo	Tiempo de Desarrollo	
1° Criterio	Eléctricos	7	5	5	9	5	9	5	4	
	Hidráulicos	-8	-8	7	-8	-9	6	-7	-2	
	Neumáticos	-6	-2	2	-6	-3	2	-2	-2	
2° Criterio	Eléctricos	8	-2	-2	10	7	8	6	8	
	Hidráulicos	-6	-10	10	-6	8	0	-7	-4	
	Neumáticos	-8	8	-6	-1	-7	-5	10	2	
										Total
Criterio Total	Eléctricos	7.5	1.5	1.5	9.5	6	8.5	5.5	6	**46**
	Hidráulicos	-7	-9	8.5	-7	-0.5	3	-7	-3	**-22**
	Neumáticos	-7	3	-2	-3.5	-5	-1.5	4	0	**-12**

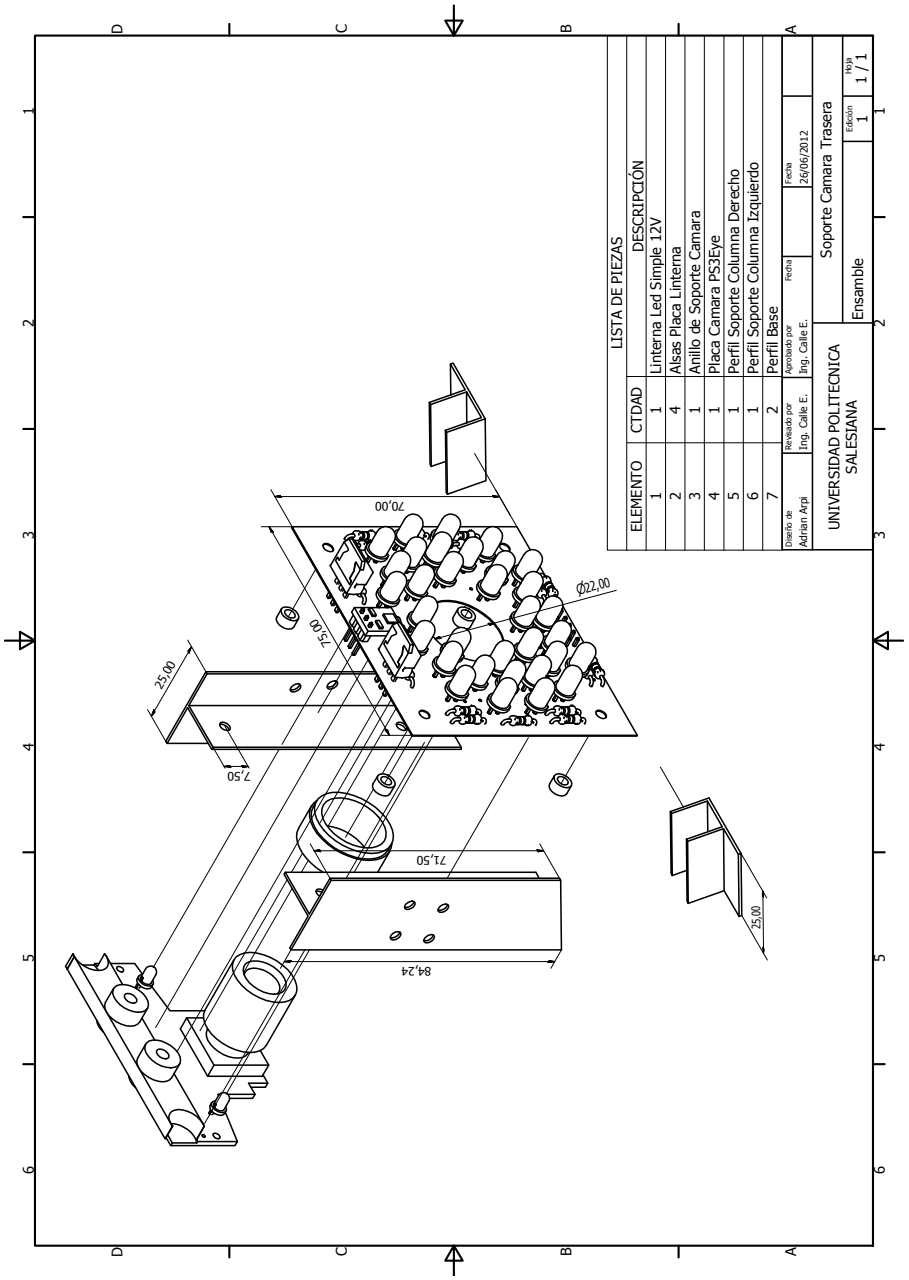
C

PLANOS DE LAS ESTRUCTURAS MECÁNICAS DE SOPORTE PARA TARJETAS ELECTRONICAS.

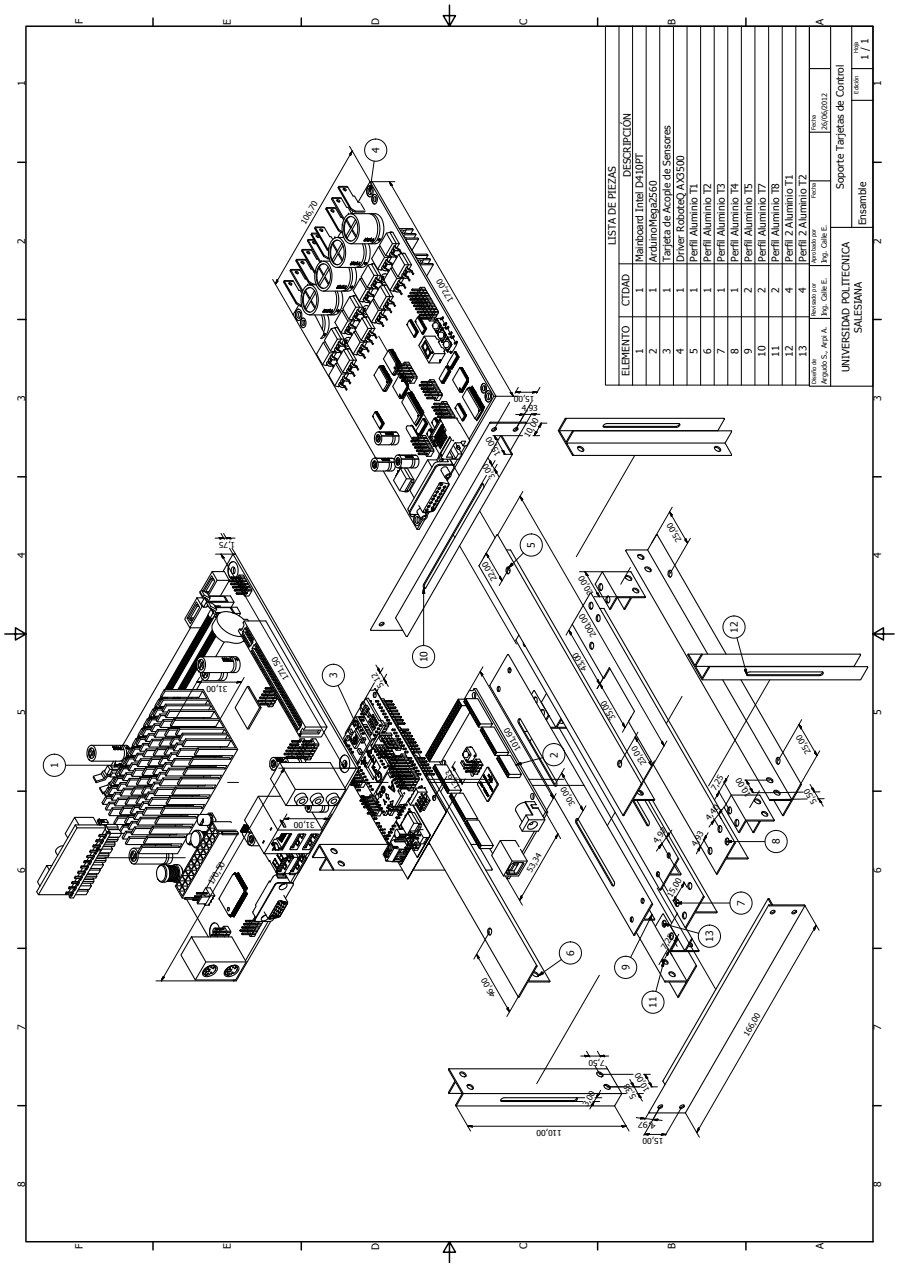
C.1 PLANO SOPORTE CAMARA ESTEREO



C.2 PLANO SOPORTE CAMARA SIMPLE



C.3 PLANO SOPORTE TARJETAS DE CONTROL



BIBLIOGRAFÍA

[1] Arduino - HomePage. http://www.arduino.cc/es/. (Citado en la página 66.)

[2] AX3500 - dual 60A, brushed DC motor controller | brushed DC motor controllers. http://www.roboteq.com/brushed-dc-motor-controllers/ax3500-dual-60a-brushed-dc-motor-controller. (Citado en la página 91.)

[3] Cambridge in colour. http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/. (Citado en las páginas xv y 22.)

[4] cplusplus.com - the c++ resources network. http://www.cplusplus.com/. (Citado en la página 64.)

[5] Custom battery chargers, UPS, and power supplies for OEMs in a hurry from PowerStream. http://www.powerstream.com/.

[6] Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 mhz a 100 ghz recomendacion uit-r p.1238-4.

[7] Documentation - ROS wiki. http://www.ros.org/wiki/. (Citado en la página 117.)

[8] Easy software products. http://www.easysw.com/.

[9] Ejemplos de java y C/Linux. http://www.chuidiang.com/.

[10] FFmpeg. http://ffmpeg.org/. (Citado en la página 68.)

[11] Front page | the open group. http://www.opengroup.org/. (Citado en la página 64.)

[12] A generic telerobotics architecture for c-5 industrial processes : Backes, paul g. : Free download & streaming : Internet archive. http://archive.org/details/nasa_techdoc_19950005116.

[13] GStreamer: open source multimedia framework. http://gstreamer.freedesktop.org/. (Citado en la página 68.)

[14] Main page - RC helicopter wiki. http://www.rcheliwiki.com/.

[15] Monografias.com - tesis, documentos, publicaciones y recursos educativos. http://www.monografias.com/.

[16] Puppy linux community home - getting started. http://puppylinux.org/main/Overview. (Citado en la página 55.)

[17] ThinkQuest : Library. www.thinkquest.org/pls/html/think.library.

[18] USB/IP project. http://usbip.sourceforge.net/. (Citado en la página 67.)

[19] VideoLAN - VLC: official site - free multimedia solutions for all OS! http://www.videolan.org/. (Citado en la página 68.)

[20] Webopedia: Online computer dictionary for computer and internet terms and definitions. http://www.webopedia.com/.

[21] Welcome - OpenCV wiki. http://opencv.willowgarage.com/wiki/. (Citado en la página 68.)

[22] Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page. (Citado en las páginas xv, 21, y 23.)

[23] YoLinux.com: linux tutorials, help, documentation and information. http://www.yolinux.com/.

[24] Doug Abbott. *Linux for Embedded and Real-Time Applications*. Newnes, 2003.

[25] Rafael Arcin. *Robots de Servicio*. Revista Iberoamericana de automatica e informatica, 2008. (Citado en la página 2.)

[26] F.H. Arrobo. Google Academico, 2007.

[27] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley, April 2005.

[28] N.A. Balich and B. Aires-Argentina. Aspectos básicos de robots autónomos y lineamientos para la construcción de un equipo de fútbol robótico. *Universidad Abierta Interamericana*, 2004. (Citado en las páginas xv, 3, y 5.)

[29] Aníbal Ollero Baturone. *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2006. (Citado en las páginas 1 y 2.)

[30] Aníbal Ollero Baturone. *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2006. (Citado en las páginas 15, 20, 24, 25, 28, y 29.)

[31] Charles M. Bergren. *Anatomy of a Robot*. McGraw-Hill Professional, May 2003. (Citado en las páginas 12, 13, 14, y 15.)

[32] Karsten Berns and Ewald Von Puttkamer. *Autonomous Land Vehicles: Steps Towards Service Robots*. Vieweg+Teubner Verlag, September 2009. (Citado en las páginas xv, 17, 18, 24, 25, 28, y 31.)

[33] J. Borenstein, HR Everett, and L. Feng. *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*, volume 119. 1996. (Citado en las páginas 13 y 14.)

[34] B. Bouzouia and A. Rahiche. Teleoperation system of the mobile manipulator robot ROBUTER_ULM: implementation issues. In *Information, Communication and Automation Technologies, 2009. ICAT 2009. XXII International Symposium on*, pages 1 –7, October 2009.

[35] Thomas Braunl. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications With Embedded Systems*. Springer, October 2008. (Citado en las páginas 13, 16, 17, 18, 24, y 31.)

[36] Jonas Buchli. *Mobile Robots: Moving Intelligence*. Advanced Robotic Systems International, 2006. (Citado en la página 29.)

[37] I. Capell Muñoz et al. Sistema estereoscópico para teleoperación asistida y supervisión de tareas robotizadas. 2011. (Citado en la página 23.)

[38] John J. Craig. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Pearson-/Prentice Hall, 2005.

[39] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop. *Modern Control Systems*. Pearson Prentice Hall, July 2010. (Citado en la página 91.)

[40] Jesús Manuel Gómez de Gabriel, Alfonso José García Cerezo, and Aníbal Ollero Baturone. *Teleoperación y telerrobótica*. Pearson Educación, May 2006. (Citado en las páginas 24, 25, 28, y 29.)

[41] John M. Holland. *Designing Mobile Autonomous Robots*. Newnes, 2004. (Citado en las páginas 24 y 31.)

[42] Eduardo Calle Israel Avila, Julio Zambrano. *Estudio, Diseño y Construccion de un robot cuadrupedo omnidireccional*. 2007. (Citado en la página 5.)

[43] Matthew L. June. *Analysis and Design of Standard Telerobotic Control Software*. Storming Media, 1996. (Citado en la página 29.)

[44] Benjamín C. Kuo. *Sistemas de Control Automatico*. Pearson Educación, October 1996. (Citado en la página 91.)

[45] Gordon McComb. *Robot Builder's Bonanza*. McGraw-Hill Professional, May 2011. (Citado en las páginas 26, 28, y 47.)

[46] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, 2003. (Citado en la página 91.)

[47] Antonio Rogalski. *Fundamentals of Infrared Detector Technologies*. CRC Press, July 2009. (Citado en la página 28.)

[48] Robert W. Sebesta. *Concepts of programming languages*. Addison-Wesley, March 2009.

[49] Roland Siegwart and Illah Reza Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, April 2004. (Citado en las páginas 24 y 31.)

[50] Sklar. *Digital Communications: Fundamentals & Applications, 2/E*. Pearson Education, September 2009. (Citado en la página 15.)

[51] Appin Knowledge Solutions. *Robotics*. Jones & Bartlett Learning, 2007. (Citado en las páginas 16 y 19.)

[52] N. Sotomayor. ROBOTICA INDUSTRIAL. 2009.

[53] Andrew S. Tanenbaum. *Redes de Computadoras*. Pearson Educación, September 2003. (Citado en la página 15.)

[54] David Vernon. *Machine Vision: Automated Visual Inspection and Robot Vision*. Prentice Hall, 1991. (Citado en la página 26.)