

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT
CUATRICAR ASISTENTE DE SIMPLE TRACCIÓN CON
SEGUIMIENTO DE ESQUELETO POR MEDIO DEL DISPOSITIVO
DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
MICROSOFT KINECT”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

REALIZADO POR:

JOSUET BERNARDO LEORO MENDOZA

SERGIO ALEJANDRO ROMERO AGUILAR

DIRECTOR: ING. ALEJANDRO CHACÓN

CODIRECTOR: ING. MILTON ACOSTA

Sangolquí, 2013 - 05 - 22

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CUATRICAR ASISTENTE DE SIMPLE TRACCIÓN CON SEGUIMIENTO DE ESQUELETO POR MEDIO DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MICROSOFT KINECT**”, fue realizado en su totalidad por Josuet Bernardo Leoro Mendoza y Sergio Alejandro Romero Aguilar, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera en Mecatrónica.

Ing. Luis Alejandro Chacón

Chacón Encalada

DIRECTOR

Ing. Milton Gonzalo

Acosta Jarrín

CODIRECTOR

Sangolquí, 2013-05-22

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CUATRICAR
ASISTENTE DE SIMPLE TRACCIÓN CON SEGUIMIENTO DE ESQUELETO
POR MEDIO DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE
IMÁGENES MICROSOFT KINECT”**

ELABORADO POR:

Josuet Bernardo Leoro Mendoza

Sergio Alejandro Romero Aguilar

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.

Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Ing. Luis Manuel Echeverría Yánez.

Sangolquí, 2013-05-22

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Josuet Bernardo Leoro Mendoza y Sergio Alejandro Romero Aguilar

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT CUATRICAR ASISTENTE DE SIMPLE TRACCIÓN CON SEGUIMIENTO DE ESQUELETO POR MEDIO DEL DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MICROSOFT KINECT”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Josuet Bernardo Leoro Mendoza

Sergio Alejandro Romero Aguilar

Sangolquí, 2013-05-22

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi padre Holger, que aunque no tuve la oportunidad de conocerlo en vida siempre fue una inspiración para mí por la gran persona y gran profesional que las personas que lo conocieron siempre me han contado. A mi madre Mariana, por el esfuerzo que ha puesto para sacar adelante a sus hijos; también es una inspiración para mí por darles a sus hijos ejemplo de lucha, perseverancia y alegría ante cualquier circunstancia. Todos los logros de mi vida han sido gracias a ustedes.

Josuet Bernardo Leoro Mendoza

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de grado a mis abuelos, Sergio Romero, Clemencia Martínez y Laura Estévez por haber sido mis ejemplos de vida, por su sacrificio y trabajo, pero sobre todo por haberme dado siempre todo su amor; a mis padres, Gustavo Romero y Mariana Aguilar por haber hecho de mí, más que un buen profesional un buen hombre, les dedico a ustedes mi sacrificio, porque nunca podré pagarles todo lo que han hecho por mí y porque por ustedes es que estoy aquí, cumpliendo una meta más.

Sergio Alejandro Romero Aguilar

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Holger, por ser mi ejemplo a seguir, cada meta que logro en mi vida lo hago pensando en que algún día podre ser como tú.

A mi madre, Mariana, por su esfuerzo y lucha día a día para poder sacarnos adelante a mí y a mis hermanos.

A mi padrastro, Silvio, que aunque no tuvimos una buena relación cuando estabas presente, por ti aprendí que todo es posible cuando hay dedicación.

A mis tías, Sandra y Jaqueline, por su apoyo moral y económico no solo para este proyecto sino también para cada vez que he atravesado momentos difíciles.

A mis hermanos mayores, Holger y José Luis, por siempre estar al tanto de mí durante mis estudios en esta carrera y apoyarme cuando lo he necesitado.

A mis hermanos menores, Silvio, María y Rafael, porque los momentos que compartimos reflejan de una manera especial un sentimiento de cariño y apoyo en todo momento.

A todos mis primos, con ustedes recuerdo siempre que mi familia sonrío siempre sin importar los malos momentos y que compartir con la familia es natural en nosotros.

A todos mis familiares, su apoyo incondicional me ayudó a seguir adelante y sé que en el camino que me resta también estarán ahí.

A los padres de mi compañero de tesis, Sergio y Mariana, por acogerme en su hogar en el transcurso de este proyecto y apoyarnos en todo el proceso.

A mi mejor amiga, Carina, por acompañarme tanto en los peores como en los mejores, momentos. Gracias por tu amistad incondicional.

A mi compañero y amigo, Sergio, por apoyarme y soportarme siempre sin importar los errores que haya cometido.

A mi grupo más cercano de amigos, Daniel, Carlos y Sergio, junto a ustedes salimos adelante durante toda la carrera al apoyarnos mutua y desinteresadamente, gracias por permitirme formar parte de este grupo de buenos amigos.

A todos mis amigos, me faltan líneas de esta hoja para nombrarlos a todos, gracias por su apoyo y consejos, he logrado todo esto gracias a ustedes.

Josuet Bernardo Leoro Mendoza

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todas las bendiciones a lo largo de toda mi carrera universitaria, por haberme ayudado a levantarme de los errores cometidos y haber puesto en mi camino a todas esas personas que me apoyaron en esta etapa.

A mi padre, Gustavo, por la constancia, la moral, el apoyo, por todos los consejos impartidos a lo largo de mi vida profesional, por enseñarme que el valor del estudio no tiene comparación, por cada enseñanza de vida, por haberme convertido en el hombre que ahora soy, y haberme dado todo en esta vida.

A mi madre, Mariana, por el amor incondicional, la paciencia, el sacrificio diario por verme realizado como profesional, por cada consejo, cada bendición de las mañanas para poder superar las adversidades de todos día, por siempre haber creído en mí y siempre darme esperanza.

A mis hermanos, Freddy y Yanina, por haberme guiado con sus consejos y su cariño en el transcurso de toda mi vida.

A Grace, por el cariño, la paciencia, la comprensión, el sacrificio durante todo este tiempo, y por siempre haber podido confiar en ti en los momentos difíciles.

A toda mi familia, por el cariño que me han dado y por siempre haber creído en mí.

A mi compañero de tesis, Josuet, por el apoyo constante, por toda la ayuda durante toda la carrera y por su amistad incondicional.

A mis amigos, por haber compartido esta hermosa etapa de la vida, con risas, llantos, juegos, reuniones, pero también en el aula de clases, dando lo mejor de cada uno, porque cada amanecida valió la pena.

Sergio Alejandro Romero Aguilar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIAS.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xx
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xxvii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxxv
RESUMEN	xxxvi
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	5
1.3 ALCANCE DEL PROYECTO	6
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 GENERAL.....	6
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	6
1.5 METODOLOGÍA	7
CAPÍTULO 2.....	9

FUNDAMENTO TEÓRICO DEL ROBOT	9
2.1 DESCRIPCIÓN	9
2.1.1 ROBÓTICA DE SERVICIO	10
2.1.2 ESTUDIO DE LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ. .	12
2.1.2.1 Discapacidad motriz.....	12
2.1.2.2 Limitaciones de una persona con discapacidad motriz	12
2.1.2.3 Antropometría, alcances y velocidad de una persona con discapacidad motriz.....	14
2.1.2.3.1 Antropometría	14
2.1.2.3.2 Alcances.....	16
2.1.2.3.3 Velocidad	17
2.2 CARACTERÍSTICAS.....	18
2.2.1 MÉTODO DE DESPLIEGUE DE LA FUNCION DE CALIDAD (QFD)	18
2.2.1.1 Requerimientos del cliente	19
2.2.1.2 Características técnicas	20
2.2.1.2 Análisis de resultados de la matriz QFD.	22
2.2.2 ESPECIFICACIONES DEL RAD4-23.....	23
2.2.2.1 Potencia del motor y velocidad del rad4-23.	24
2.2.2.2 Consumo de energía.....	27
2.2.2.3 Dimensiones del RAD4-23	27
2.2.2.4 Fijación de especificaciones.....	28
2.2.2.5 Esquematización funcional del RAD4-23	30
2.2.2.5.1 Identificación de la función principal del sistema.....	30
2.2.2.5.2 Identificación de funciones secundarias.....	31
CAPÍTULO 3.....	33

DISEÑO DEL RAD4-23	33
3.1 SOLUCIÓN PROPUESTA	33
3.2 PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO	33
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO PRINCIPAL.....	34
3.3.1 ALTERNATIVAS DE MOTORES	34
3.3.1.1 Motor a combustión vs. Motor eléctrico.....	34
3.3.1.2 Motor de corriente alterna vs. Motor de corriente continua	35
3.3.1.3 Motores de corriente continua.....	36
3.3.1.3.1 Motor a pasos	36
3.3.1.3.2 Servomotor.....	37
3.3.1.3.3 Motor con escobillas	37
3.3.1.4 Comparación entre tipos de motores de corriente continua	37
3.3.2 ALTERNATIVA SELECCIONADA.....	38
3.4 SISTEMAS QUE CONFORMAN EL RAD4-23.....	38
3.4.1 SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA.....	39
3.4.1.1 Caracterización	39
3.4.1.2 Elementos	40
3.4.2 SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL.....	41
3.4.2.1 Caracterización	41
3.4.2.2 Elementos	42
3.4.3 SISTEMA DE DETECCIÓN	42
3.4.3.1 Caracterización	43
3.4.3.2 Elementos	43
3.4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	44
3.4.4.1 Caracterización	44
3.4.4.2 Elementos	45

3.5	DISEÑO DE SISTEMAS	46
3.5.1	DISEÑO DEL SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA	47
3.5.1.1	Diseño eléctrico.....	47
3.5.1.1.1	Motor	47
3.5.1.1.1.1	Motoreductor CM808075	48
3.5.1.2	Diseño electrónico.....	52
3.5.1.2.1	Controlador de motores	52
3.5.1.2.1.1	Placa controladora Pololu VNH5019 de motor dual para Arduino	53
3.5.1.3	Diseño mecánico.....	56
3.5.1.3.1	Estructura principal	56
3.5.1.3.1.1	Estructura de soporte	56
3.5.1.3.1.1.1	Dimensionamiento a partir de requisitos.....	58
3.5.1.3.1.1.2	Comodidad para el usuario a la hora de colocar productos..	58
3.5.1.3.1.1.3	Espacio adecuado para colocar batería y motores.....	59
3.5.1.3.1.1.4	Altura y espacio adecuados para el soporte del Kinect	60
3.5.1.3.1.1.5	Simulación de deformación, esfuerzos y factor de seguridad de las partes de la estructura principal.....	62
3.5.1.3.1.1.5.1	Estructura inferior	62
3.5.1.3.1.1.5.2	Estructura para el Kinect.....	68
3.5.1.3.1.2	Planchas de soporte	71
3.5.1.3.1.2.1	Plancha de soporte para batería.....	71
3.5.1.3.1.2.1.1	Análisis para platinas de espesor 2mm	75
3.5.1.3.1.2.1.2	Análisis para platinas de espesor 2.5mm	77
3.5.1.3.1.2.1.3	Análisis para platinas de espesor 3mm	78
3.5.1.3.1.2.1.4	Simulación de deformación, esfuerzos y factor de seguridad del ensamble platinas-plancha.....	79

3.5.1.3.1.2.1.5	Interpretación de análisis realizados y resultados obtenidos	85
3.5.1.3.1.2.2	Plancha de soporte para Kinect.....	85
3.5.1.3.1.2.2.1	Simulación de deformación de la plancha de soporte para Kinect.....	86
3.5.1.3.2	Cajas reductoras	88
3.5.1.3.3	Tipo de tracción.....	88
3.5.1.3.4	Sujeción de motores	89
3.5.1.3.4.1	Simulación de deformación del acople de los motores.....	91
3.5.1.3.5	Llantas delanteras.....	93
3.5.1.3.6	Ruedas locas traseras	93
3.5.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL.....	95
3.5.2.1	Diseño electrónico.....	95
3.5.2.1.1	Dispositivo de visión artificial.....	95
3.5.2.1.2	Computador	96
3.5.2.1.2.1	Mamba SBC EBX-37	97
3.5.2.1.2.2	Apple Mac Mini Core i5 2.3 (Mediados del 2011)	100
3.5.2.1.2.3	Selección del computador.....	104
3.5.2.1.2.4	Salida de audio	105
3.5.2.1.3	Microcontrolador	106
3.5.2.1.4	Controlador de motores	108
3.5.2.2	Diseño mecánico.....	109
3.5.2.2.1	Sujeción del dispositivo de visión artificial.....	109
3.5.2.2.2	Protección del dispositivo de visión artificial.....	110
3.5.2.2.3	Carcasa de sujeción para el computador.....	112
3.5.2.2.4	Sujeción del microcontrolador	115
3.5.2.2.5	Sujeción del controlador de motores.....	115

3.5.2.2.6	Estructura de soporte para el altavoz.....	116
3.5.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN.....	118
3.5.3.1	Diseño electrónico.....	118
3.5.3.1.1	Sensores.....	118
3.5.3.1.1.1	Conexión de sensores.....	120
3.5.3.1.1.2	Ubicación de sensores delanteros.....	121
3.5.3.1.1.3	Ubicación de sensores traseros.....	123
3.5.3.2	Diseño mecánico.....	124
3.5.3.2.1	Soporte para los sensores delanteros.....	125
3.5.3.2.2	Estructura de los sensores delanteros.....	127
3.5.3.2.3	Estructura para los sensores traseros.....	129
3.5.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	131
3.5.4.1	Diseño eléctrico.....	131
3.5.4.1.1	Fuentes.....	132
3.5.4.1.1.1	Fuente para los motores.....	132
3.5.4.1.1.2	Fuente para el Kinect.....	133
3.5.4.1.1.3	Fuente para el computador.....	135
3.5.4.1.1.3.1	Fuente para el microcontrolador.....	137
3.5.4.1.1.3.2	Fuente para el altavoz.....	137
3.5.4.1.1.4	Fuente para sensores ultrasónicos.....	137
3.5.4.1.2	Batería.....	138
3.5.4.1.2.1	Cargador de batería.....	142
3.5.4.1.2.1.1	Requerimientos del cargador.....	142
3.5.4.1.2.1.2	Tiempos de carga.....	143
3.5.4.1.2.1.3	Conexión del cargador.....	144
3.5.4.2	Diseño electrónico.....	145

3.5.4.2.1	Placa electrónica para conexión de elementos	145
3.5.4.3	Diseño mecánico.....	148
3.5.4.3.1	Fijación de batería.....	148
3.5.4.3.2	Sujeción del regulador de voltaje para el computador	150
3.5.4.3.3	Sujeción de la placa electrónica.....	150
3.6	RESULTADO	151
3.6.1	CAD del RAD4-23	151
3.6.2	Especificaciones técnicas	155
CAPÍTULO 4.....		156
SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL		156
4.1	SENSOR MICROSOFT KINECT PARA WINDOWS.....	157
4.1.1	CARACTERÍSTICAS.....	157
4.1.2	ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES	159
4.1.3	FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIMIENTO DE CUERPO DEL SENSOR KINECT	161
4.1.4	ESPACIOS DE COORDENADAS.....	164
4.1.4.1	Espacio de coordenadas de profundidad.....	164
4.1.4.1.1	Rangos del espacio de profundidad.....	165
4.1.4.2	Espacio de coordenadas del esqueleto.....	166
4.1.5	ARTICULACIONES DEL ESQUELETO CAPTURADO POR EL SENSOR KINECT	167
4.2	VALIDACIÓN DEL SENSOR KINECT	169
4.2.1	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	169
4.2.1.1	METODOLOGÍA Y VARIABLES A MEDIR	172
4.2.1.2	Datos obtenidos	174
4.2.1.2.1	Posición Z = 1.6m X = 0m.....	174

4.2.1.2.2	Posición $Z = 1.8\text{m}$ $X = 0\text{m}$	176
4.2.1.2.3	Posición $Z = 2.5\text{m}$ $X = 0\text{m}$	177
4.2.1.2.4	Posición $Z = 3.2\text{m}$ $X = 0\text{m}$	179
4.2.1.2.5	Posición $Z = 1.6\text{m}$ $X = 0.66\text{m}$	181
4.2.1.2.6	Posición $Z = 1.8\text{m}$ $X = 0.66\text{m}$	182
4.2.1.2.7	Posición $Z = 2.5\text{m}$ $X = 0.66\text{m}$	184
4.2.1.2.8	Posición $Z = 3.2\text{m}$ $X = 0.66\text{m}$	186
4.2.1.2.9	Posición $Z = 1.6\text{m}$ $X = -0.66\text{m}$	187
4.2.1.2.10	Posición $Z = 1.8\text{m}$ $X = -0.66\text{m}$	189
4.2.1.2.11	Posición $Z = 2.5\text{m}$ $X = -0.66\text{m}$	191
4.2.1.2.12	Posición $Z = 3.2\text{m}$ $X = -0.66\text{m}$	192
4.2.1.3	Análisis de resultados	194
4.2.1.4	Selección de la articulación para el funcionamiento del RAD4-23	199

CAPÍTULO 5.....200

CONSTRUCCIÓN DEL RAD4-23.....200

5.1	DISEÑO DEL PROCESO DE CONTRUCCIÓN	200
5.2	CAMBIOS REALIZADOS AL DISEÑO COMERCIAL DEL RAD4-23	208
5.2.1	COMPUTADOR	208
5.2.1.1	Computador propuesto.....	208
5.2.1.2	Espacio adecuado para colocar la computadora portátil.....	209
5.2.1.3	Estructura para la computadora portátil	210
5.2.1.4	Plancha de soporte para computadora portátil.....	214
5.2.1.4.1	Simulación de esfuerzos, deformación y factor de seguridad en la plancha de soporte para computadora portátil.	216
5.2.1.4.2	Interpretación de resultados obtenidos	219

5.2.1.5	Resultado estructura principal.....	219
5.2.2	ACOPLE DE SENSORES.....	220
5.3	SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA.....	221
5.3.1	UNIÓN DEL MOTOR A LA ESTRUCTURA	221
5.3.2	UNIÓN DEL PUENTE H AL ARDUINO MEGA	223
5.3.3	UNIÓN DE LAS PARTES DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	225
5.3.3.1	Estructura inferior.....	225
5.3.3.2	Estructura del Kinect.....	226
5.3.3.3	Estructura de la computadora portátil.....	226
5.3.3.4	Planchas y platinas	228
5.3.4	UNIÓN DE LA LLANTA CON EL MOTOR	230
5.3.5	CONEXIÓN DEL MOTOR AL PUENTE H	231
5.4	SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL.....	232
5.4.1	UNIÓN DEL KINECT CON LA PLANCHA	232
5.4.2	UNIÓN DEL COBERTOR DEL KINECT A LA PLANCHA.....	233
5.4.3	UNIÓN DEL ARDUINO MEGA AL PLACA ELECTRÓNICA	234
5.4.4	CONEXIÓN DEL KINECT Y DEL ARDUINO MEGA AL COMPUTADOR	234
5.5	SISTEMA DE DETECCIÓN	235
5.5.1	UNIÓN DE LOS SENSORES TRASEROS A LA PLANCHA	235
5.5.2	CONEXIÓN DE LOS SENSORES AL ARDUINO MEGA.....	236
5.6	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	237
5.6.1	UNIÓN DE LA BATERÍA A LA PLANCHA	237
5.6.2	UNIÓN DE LA PLACA ELECTRÓNICA A LA PLANCHA.....	238
5.6.3	CONEXIÓN DE FUENTES	239
5.6.3.1	Alimentación de los motores	240

5.6.3.2 Alimentación del sensor Kinect	240
5.6.3.3 Alimentación de los sensores.....	241
5.7 RESULTADO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL RAD4-23	242
CAPÍTULO 6.....	245
PROGRAMACIÓN.....	245
6.1 DISEÑO DEL PROGRAMA.....	245
6.1.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA	245
6.1.1.1 Requerimientos de funcionamiento del RAD4-23	246
6.1.1.1.1 Seguro.....	247
6.1.1.1.1.1 Evitar colisionar con el usuario	247
6.1.1.1.1.2 Detectar objetos entre el usuario y el robot mientras se realiza el seguimiento	248
6.1.1.1.2 Fácil de usar.....	248
6.1.1.1.3 Distancia de seguimiento entre el usuario y el robot de 60cm .	248
6.1.1.1.4 No seguir a otra persona mientras se encuentra en funcionamiento con el usuario.....	249
6.1.1.1.5 Al curvar evitar colisiones con las estanterías.....	249
6.1.2 ARQUITECTURA DEL PROGRAMA	250
6.1.3 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.....	251
6.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA FUNCIONAMIENTO DEL RAD4-23	255
6.2.1 COMUNICACIÓN ENTRE LA PLACA ARDUINO Y EL COMPUTADOR	256
6.2.2 SUBPROCESOS DEL PROGRAMA.....	258
6.2.2.1 Inicialización.....	259
6.2.2.2 Adquisición de datos	262
6.2.2.3 Decisión de movimientos	264

6.2.2.3.1	Giro fuerte izquierda.....	268
6.2.2.3.2	Giro fuerte derecha	269
6.2.2.3.3	Giro suave izquierda	270
6.2.2.3.4	Giro suave derecha.....	271
6.2.2.4	Finalización	273
CAPÍTULO 7.....		274
VALIDACIÓN GENERAL DEL RAD4-23		274
7.1	REALIZACIÓN DE PRUEBAS	274
7.1.1	DISEÑO DE PRUEBAS	275
7.1.2	TIPOS DE PRUEBAS	279
7.1.3	METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS.....	283
7.1.4	EJECUCIÓN DE LA PRUEBA	285
7.1.4.1	Pruebas de seguimiento y detección sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23.	285
7.1.4.2	Pruebas de seguimiento y detección con personas alrededor del usuario y del RAD4-23.	286
7.1.4.3	Pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes sin ruido.....	286
7.1.4.4	Pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes con ruido.	287
7.2	RESULTADO DE LAS PRUEBAS	287
7.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CALIFICACIÓN DEL RAD4-23..	289
CAPÍTULO 8.....		291
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		291
8.1	CONCLUSIONES.....	291
8.2	RECOMENDACIONES	293

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Requerimientos del Cliente.	19
Tabla 2.2	Características Técnicas.	20
Tabla 2.3	Simbología para grados de correlación entre Requerimientos del Cliente y Características Técnicas.....	21
Tabla 2.4	Simbología para grado de correlación entre Características Técnicas.	21
Tabla 2.5	Resultados de la matriz QFD.	23
Tabla 2.6	Tabla de requerimientos.....	29
Tabla 3.1	Comparación entre motor AC y DC.....	35
Tabla 3.2	Comparación entre alternativas de motores de corriente continua. ...	38
Tabla 3.3	Especificaciones motoreductor CM808075.	49
Tabla 3.4	Tabla comparativa de materiales para la estructura inferior.....	66
Tabla 3.5	Especificaciones MAMBA SBC EBX-37	99
Tabla 3.6	Especificaciones Mac Mini Core i5 2.3 (Mediados del 2011)	102
Tabla 3.7	Comparación de alternativas de computador.....	104
Tabla 3.8	Especificaciones Arduino Mega 2560 R3.....	107
Tabla 3.9	Selección de sensores	119
Tabla 3.10	Comparación entre LM7812 y LM2596S.....	133
Tabla 3.11	Comparación entre opciones de batería.....	140
Tabla 3.12	Tiempos de carga.....	143
Tabla 3.13	Especificaciones técnicas del RAD4-23.	155
Tabla 4.1	Especificaciones de los componentes Kinect para Windows.	159
Tabla 4.2	Metodología para la ejecución de las pruebas de validación del sensor Kinect.....	173
Tabla 4.3	Datos obtenidos para la posición Z = 1.6m y X = 0m.	174

Tabla 4.4	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición la Z = 1.6m y X = 0m, usuario de frente.	174
Tabla 4.5	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de frente.	175
Tabla 4.6	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de espaldas.	175
Tabla 4.7	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de espaldas.	175
Tabla 4.8	Datos obtenidos para la posición Z = 1.8m y X = 0m.	176
Tabla 4.9	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de frente.	176
Tabla 4.10	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de frente.	176
Tabla 4.11	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de espaldas.	177
Tabla 4.12	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de espaldas.	177
Tabla 4.13	Datos obtenidos para la posición Z = 2.5m y X = 0m.	177
Tabla 4.14	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = 0m, usuario de frente.	178
Tabla 4.15	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0m, usuario de frente.	178
Tabla 4.16	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = 0m, usuario de espaldas.	178
Tabla 4.17	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0m, usuario de espaldas.	179
Tabla 4.18	Datos obtenidos para la posición Z = 3.2m y X = 0m.	179
Tabla 4.19	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0m, usuario de frente.	179

Tabla 4.20	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = 0\text{m}$, usuario de frente.	180
Tabla 4.21	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = 0\text{m}$, usuario de espaldas.	180
Tabla 4.22	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = 0\text{m}$, usuario de espaldas.	180
Tabla 4.23	Datos obtenidos para la posición $Z = 1.6\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$	181
Tabla 4.24	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 1.6\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	181
Tabla 4.25	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 1.6\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	181
Tabla 4.26	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 1.6\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de espaldas.	182
Tabla 4.27	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 1.6\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de espaldas.	182
Tabla 4.28	Datos obtenidos para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$	182
Tabla 4.29	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	183
Tabla 4.30	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	183
Tabla 4.31	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de espaldas.	183
Tabla 4.32	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de espaldas.	184
Tabla 4.33	Datos obtenidos para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$	184
Tabla 4.34	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	184
Tabla 4.35	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = 0.66\text{m}$, usuario de frente.	185

Tabla 4.36	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de espaldas.	185
Tabla 4.37	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de espaldas.	185
Tabla 4.38	Datos obtenidos para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m.	186
Tabla 4.39	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de frente.	186
Tabla 4.40	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de frente.	186
Tabla 4.41	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de espaldas.	187
Tabla 4.42	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de espaldas.	187
Tabla 4.43	Datos obtenidos para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m.	187
Tabla 4.44	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de frente.	188
Tabla 4.45	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de frente.	188
Tabla 4.46	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de espaldas.	188
Tabla 4.47	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de espaldas.	189
Tabla 4.48	Datos obtenidos para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m.	189
Tabla 4.49	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de frente.	189
Tabla 4.50	Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de frente.	190
Tabla 4.51	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de espaldas.	190

Tabla 4.52	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 1.8\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas.....	190
Tabla 4.53	Datos obtenidos para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$	191
Tabla 4.54	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de frente.....	191
Tabla 4.55	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de frente.....	191
Tabla 4.56	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas.....	192
Tabla 4.57	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 2.5\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas.....	192
Tabla 4.58	Datos obtenidos para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$	192
Tabla 4.59	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de frente.....	193
Tabla 4.60	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de frente.....	193
Tabla 4.61	Resultados de error absoluto y error relativo para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas.....	193
Tabla 4.62	Resultados de desviación estándar para la posición $Z = 3.2\text{m}$ y $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas.....	194
Tabla 4.63	Resumen de errores relativos para $X = 0$, usuario de frente.....	194
Tabla 4.64	Resumen de errores relativos para $X = 0$, usuario de espaldas.....	194
Tabla 4.65	Resumen de errores relativos para $X = 0.66$, usuario de frente.....	195
Tabla 4.66	Resumen de errores relativos para $X = 0.66$, usuario de espaldas.....	195
Tabla 4.67	Resumen de errores relativos para $X = -0.66$, usuario de frente....	195
Tabla 4.68	Resumen de errores relativos para $X = -0.66$, usuario de espaldas.....	196

Tabla 4.69	Resumen de desviaciones estándar para $X = 0m$, usuario de frente	196
Tabla 4.70	Resumen de desviaciones estándar para $X = 0m$, usuario de espaldas	197
Tabla 4.71	Resumen de desviaciones estándar para $X = 0.66m$, usuario de frente	197
Tabla 4.72	Resumen de desviaciones estándar para $X = 0.66m$, usuario de espaldas	197
Tabla 4.73	Resumen de desviaciones estándar para $X = -0.66m$, usuario de frente	198
Tabla 4.74	Resumen de desviaciones estándar para $X = -0.66m$, usuario de espaldas	198
Tabla 6.1	Parámetros de configuración de la comunicación serial entre Arduino y el computador.....	257
Tabla 7.1	Diseño de pruebas.	275
Tabla 7.2	Ponderación para las pruebas de campo.	277
Tabla 7.3	Tabla para ingreso de datos de las pruebas de seguimiento.	278
Tabla 7.4	Tabla para ingreso de datos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz.	278
Tabla 7.5	Metodología de las pruebas.	283
Tabla 7.6	Datos obtenidos de las pruebas de seguimiento y detección sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23.....	285
Tabla 7.7	Datos obtenidos de las pruebas de seguimiento y detección con personas alrededor del usuario y del RAD4-23.....	286
Tabla 7.8	Datos obtenidos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes sin ruido.....	286
Tabla 7.9	Datos obtenidos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes con ruido.....	287
Tabla 7.10	Resumen de resultados de las pruebas de seguimiento y control. ...	287

Tabla 7.11 Resumen de resultados de reconocimiento de comandos de voz. ...	288
Tabla 8.1 Cumplimiento de los requerimientos del usuario.	292

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Silla de ruedas motorizada.....	2
Figura 1.2	Escúter para compras.....	2
Figura 1.3	B.O.S.S utilizado en un centro comercial.....	3
Figura 1.4	Wi-GO con su creador Luis de Matos	4
Figura 2.1	Limitaciones de una persona con discapacidad motriz.....	13
Figura 2.2	Antropometría de persona en silla de ruedas.....	15
Figura 2.3	Zona de alcance de persona en silla de ruedas.....	17
Figura 2.4	Proceso del método QFD.....	19
Figura 2.5	Matriz despliegue de la función de calidad del sistema (QFD).....	22
Figura 2.6	Diagrama de cuerpo libre del RAD4-23.....	25
Figura 2.7	Dimensiones del RAD4-23.....	28
Figura 2.8	Caja negra de la función principal del sistema.....	31
Figura 2.9	Identificación de subsistemas funcionales en el RAD4-23.....	32
Figura 3.1	Diagrama de bloques del sistema motriz y estructura.....	40
Figura 3.2	Diagrama de bloques del sistema de seguimiento y control.....	41
Figura 3.3	Diagrama de bloques del sistema de detección.....	43
Figura 3.4	Diagrama de bloques del sistema de alimentación.....	45
Figura 3.5	Curva característica del motor CM808075.....	50
Figura 3.6	Diagrama de aplicación típico del driver VNH5019.....	54
Figura 3.7	Placa driver Pololu VNH5019 de motor dual para Arduino.....	54
Figura 3.8	Placa driver Pololu VNH5019 montada sobre un Arduino UNO.....	55
Figura 3.9	Forma de la estructura de soporte.....	57
Figura 3.10	Dimensiones de la estructura para la canastilla.....	59
Figura 3.11	Dimensiones de la estructura inferior.....	60

Figura 3.12	Dimensiones de la estructura para el Kinect.....	61
Figura 3.13	Geometrías fijas y cargas aplicadas a la estructura inferior.....	65
Figura 3.14	Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura inferior.....	65
Figura 3.15	Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura inferior.....	67
Figura 3.16	Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura inferior.....	67
Figura 3.17	Geometrías fijas y cargas aplicadas a la estructura para el Kinect..	69
Figura 3.18	Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura para el Kinect.	69
Figura 3.19	Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura para el Kinect.....	70
Figura 3.20	Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura para el Kinect.....	71
Figura 3.21	Forma y dimensión de la plancha de soporte para baterías y distribución de platinas.....	72
Figura 3.22	Ubicación de las baterías en su plancha de soporte.....	73
Figura 3.23	Cálculo de la deflexión máxima en una viga con sujeciones fijas en los extremos y carga puntual en el centro.....	74
Figura 3.24	Geometrías fijas y fuerzas aplicadas al ensamble platinas-plancha.....	81
Figura 3.25	Resultados del análisis de esfuerzos en el ensamble platinas-plancha.....	82
Figura 3.26	Resultados del análisis de desplazamientos en el ensamble platinas-plancha.....	83
Figura 3.27	Resultados del trazado de factor de seguridad en el ensamble platinas-plancha.....	84
Figura 3.28	Forma de la plancha de soporte para Kinect.....	85
Figura 3.29	Ubicación de elementos en la plancha de soporte para Kinect.....	86

Figura 3.30	Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en la plancha de soporte para Kinect.	87
Figura 3.31	Resultados del análisis de desplazamientos en la plancha de soporte para Kinect..	88
Figura 3.32	Distribución del sistema de tracción.	89
Figura 3.33	Forma del acople de los motores.	90
Figura 3.34	Vista explosionada del montaje del motor.	90
Figura 3.35	Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en el acople de los motores..	91
Figura 3.36	Resultados del análisis de desplazamientos en el acople de los motores..	92
Figura 3.37	Vista explosionada del montaje de la llanta delantera.	93
Figura 3.38	Vista inferior de la ubicación de la ruedas loca trasera.	94
Figura 3.39	Distancia de la platina delantera al suelo.	94
Figura 3.40	Características del adaptador de corriente de Microsoft Kinect I para Windows.	96
Figura 3.41	Mamba EBX SBC con Intel Core 2 Duo.	98
Figura 3.42	Pioneer P3-DX.	98
Figura 3.43	Apple Mac Mini Core i5 2.3..	101
Figura 3.44	Robot bTop	102
Figura 3.45	Altavoz iSound GoSonic.	106
Figura 3.46	Arduino Mega 2560 R3.	108
Figura 3.47	Clip de montaje para Kinect.	109
Figura 3.48	Vista explosionada del montaje del Kinect.	110
Figura 3.49	Cobertor para el dispositivo Microsoft Kinect..	111
Figura 3.50	Vista explosionada del montaje del cobertor del dispositivo Microsoft Kinect.	112
Figura 3.51	Carcasa de sujeción para el computador	114

Figura 3.52	Ubicación del Mac Mini en la plancha de soporte para batería.	115
Figura 3.53	Estructura de soporte para altavoz.....	116
Figura 3.54	Montaje de altavoz y estructura.....	117
Figura 3.55	Ubicación del altavoz en el RAD4-23.....	117
Figura 3.56	Zonas de detección.....	118
Figura 3.57	Sensor ultrasónico HC-SR04.....	120
Figura 3.58	Conexión de sensores.....	121
Figura 3.59	Ubicación entre sensores delanteros.....	122
Figura 3.60	Inclinación de sensores delanteros.....	122
Figura 3.61	Ubicación sensores traseros.....	123
Figura 3.62	Desviación sensores traseros.....	124
Figura 3.63	Vista explosionada del acople de la estructura para los sensores delanteros con los motores.....	125
Figura 3.64	Medidas del soporte para los sensores delanteros.....	126
Figura 3.65	Acople angular de hierro de 1.5mm.....	127
Figura 3.66	Acople de acrílico.....	128
Figura 3.67	Vista explosionada del montaje de los sensores delanteros.....	128
Figura 3.68	Vista explosionada del montaje de la estructura de los sensores delanteros.....	129
Figura 3.69	Acople angular de hierro de 1.5mm.....	130
Figura 3.70	Vista explosionada del montaje de los sensores traseros.....	131
Figura 3.71	Circuito Fuente Kinect.....	135
Figura 3.72	Mac Pac Power Kit.....	136
Figura 3.73	Car-Netix CNX-P1900.....	136
Figura 3.74	Circuito fuente para sensores.....	138
Figura 3.75	Batería MARS2000 MR33-12 sellada de 12V33Ah para los motores.....	141

Figura 3.76	Cargador inteligente “G3500 NOCO genius”	143
Figura 3.77	Conexión cargador.....	145
Figura 3.78	Divisor de voltaje para medición de nivel de carga en la batería. .	146
Figura 3.79	Placa electrónica para ubicación de componentes electrónicos. ...	147
Figura 3.80	Asiento para la batería	149
Figura 3.81	Conjunto para sujeción de la batería.....	149
Figura 3.82	Ubicación del regulador de voltaje para el computador.....	150
Figura 3.83	Ubicación de la placa electrónica para conexión de componentes sobre la plancha de soporte para la batería.	151
Figura 3.84	CAD del RAD4-23.	152
Figura 3.85	CAD del RAD4-23 con canastilla modelo.....	153
Figura 3.86	Plancha inferior con todos los elementos del RAD4-23.	153
Figura 3.87	Dimensiones del RAD4-23.	154
Figura 4.1	Representación del sistema de visión artificial como caja negra. ...	156
Figura 4.2	Sensor Kinect para Windows.	157
Figura 4.3	Componentes del sensor Kinect para Windows.....	158
Figura 4.4	Rango de visión horizontal del sensor Kinect.....	160
Figura 4.5	Rango de visión vertical del sensor Kinect.....	160
Figura 4.6	Representación gráfica de las características del clasificador usado por el Kinect.....	162
Figura 4.7	Fases del funcionamiento del seguimiento de cuerpo del Kinect....	163
Figura 4.8	Valores de las muestras de profundidad.	165
Figura 4.9	Rangos del sensor de profundidad.....	165
Figura 4.10	Ejes coordenados del espacio de coordenadas del esqueleto.....	166
Figura 4.11	Articulaciones captadas por el sensor Kinect para Windows	167
Figura 4.12	Modos de seguimiento: default y sentado.	168
Figura 4.13	Plano de pruebas	171

Figura 5.1	Diagrama de proceso de construcción.....	206
Figura 5.2	Computadora portátil acer ASPIRE.....	209
Figura 5.3	Dimensiones de la estructura para la computadora portátil	210
Figura 5.4	Geometrías fijas y cargas sometidas a la estructura para la computadora portátil.....	212
Figura 5.5	Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura para la computadora portátil.....	212
Figura 5.6	Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura para la computadora portátil.....	213
Figura 5.7	Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura para la computadora portátil.	214
Figura 5.8	Forma y dimensiones de la plancha para la computadora portátil. .	215
Figura 5.9	Ensamble plancha de soporte para computadora portátil-estructura principal.	215
Figura 5.10	Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en la plancha de soporte para computadora portátil.....	217
Figura 5.11	Resultados del análisis de esfuerzos en el la plancha de soporte para computadora portátil.....	217
Figura 5.12	Resultados del análisis de desplazamientos en la plancha de soporte para computadora portátil.....	218
Figura 5.13	Resultados del análisis de esfuerzos en la plancha de soporte para computadora portátil.....	219
Figura 5.14	Estructura principal resultante.....	220
Figura 5.15	Montaje de sensores delanteros.	221
Figura 5.16	Placa de acople de motores.....	222
Figura 5.17	Resultado ensamble del acople de motores.	223
Figura 5.18	Ensamble Puente H con Arduino MEGA.....	224
Figura 5.19	Ubicación de los pines del Puente H y Arduino MEGA.	224

Figura 5.20	Estructura inferior.....	225
Figura 5.21	Estructura del Kinect.....	226
Figura 5.22	Estructura de la computadora portátil.....	227
Figura 5.23	Estructura principal.....	227
Figura 5.24	Ubicación de las platinas.....	228
Figura 5.25	Fijación de la plancha inferior.....	229
Figura 5.26	Ubicación de las planchas.....	229
Figura 5.27	Unión de llanta con el motor.....	230
Figura 5.28	Conexión del motor al puente H.....	231
Figura 5.29	Esquema de conexión del motor al puente H.....	231
Figura 5.30	Sistema de agarre del clip de montaje al Kinect.....	232
Figura 5.31	Unión del Kinect a la plancha.....	233
Figura 5.32	Unión del cobertor del Kinect a la plancha.....	233
Figura 5.33	Unión del Arduino MEGA a la placa electrónica.....	234
Figura 5.34	Unión de los sensores traseros a la plancha.....	235
Figura 5.35	Conexión de los sensores al Arduino MEGA.....	236
Figura 5.36	Conector de sensor para desmontaje.....	237
Figura 5.37	Unión de la batería a la plancha.....	238
Figura 5.38	Unión de la placa electrónica a la plancha.....	239
Figura 5.39	Placa electrónica.....	239
Figura 5.40	Alimentación de los motores.....	240
Figura 5.41	Alimentación del sensor Kinect.....	241
Figura 5.42	Alimentación de los sensores.....	241
Figura 5.43	RAD4-23 construido.....	242
Figura 5.44	Plancha inferior con todos los elementos del RAD4-23 construido.....	243

Figura 5.45	Vistas lateral y frontal del RAD4-23 construido.	244
Figura 6.1	Arquitectura del programa.	251
Figura 6.2	Diagrama UML del programa.	253
Figura 6.3	Diagrama de dependencia del programa del RAD4-23.	254
Figura 6.4	Comunicación entre motores, sensores, placa Arduino y computador.	257
Figura 6.5	Diagrama de flujo del programa del RAD4-23.	259
Figura 6.6	Diagrama de flujo del subproceso de inicialización.	260
Figura 6.7	Diagrama de flujo del subproceso de adquisición de datos.	263
Figura 6.8	Diagrama de flujo del subproceso de decisión de movimientos.	265
Figura 6.9	Diagrama de flujo de giro fuerte a la izquierda.	268
Figura 6.10	Diagrama de flujo de giro fuerte a la derecha.	269
Figura 6.11	Diagrama de flujo de giro suave izquierda.	270
Figura 6.12	Diagrama de flujo de giro suave izquierda.	272
Figura 6.13	Diagrama de flujo del subproceso de finalización.	273
Figura 7.1	Prueba 1.	279
Figura 7.2	Prueba 2.	279
Figura 7.3	Prueba 3.	280
Figura 7.4	Prueba 4.	280
Figura 7.5	Prueba 5.	281
Figura 7.6	Prueba 6.	281
Figura 7.7	Prueba 7.	282
Figura 7.8	Prueba 8.	282
Figura 7.9	Prueba 9.	283

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A..... ¡Error! Marcador no definido.

PLANOS DE MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN..... **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXO B..... ¡Error! Marcador no definido.

DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS..... **¡Error! Marcador no definido.**

ANEXO C..... ¡Error! Marcador no definido.

MANUAL DE USUARIO DEL RAD4-23..... **¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

El siguiente proyecto, denominado “Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Cuatricar Asistente de Simple Tracción con Seguimiento de Esqueleto por medio del Dispositivo de Adquisición y Procesamiento de Imágenes Microsoft Kinect”, plantea el diseño y construcción de un robot asistente para personas discapacitadas en silla de ruedas, el cual seguirá a la persona dentro de un supermercado para que esta se pueda desenvolver con normalidad durante esta actividad. Además se programa reconocimiento de comandos de voz para interactuar con el usuario.

La realización de este proyecto tiene como objetivo asistir a una persona usuaria de una silla de ruedas al evitarle la tarea de empujar un carrito de compras, dicha tarea tiene cierta dificultad para este tipo de personas debido a su discapacidad. Al lograr este objetivo se permite a las personas con este tipo de discapacidad física integrarse a la sociedad al realizar este tipo de tareas diarias, mejorando así su calidad de vida.

Para que el diseño satisfaga las necesidades del usuario se aplica QFD (Desarrollo de la función de calidad), que tiene como objetivo identificar las necesidades del usuario y transformarlos en requerimientos técnicos para a continuación obtener las especificaciones del robot. Utilizando este método además se identifica el elemento principal para iniciar el diseño a partir del mismo. El robot tiene un sistema de visión artificial, para lo cual se utiliza el dispositivo de adquisición y procesamiento de imágenes Microsoft Kinect, usando la función de seguimiento de esqueleto del mismo.

El robot bautizado RAD4-23 fue puesto a prueba en un supermercado de la ciudad de Quito, donde se evaluó su comportamiento frente a diferentes circunstancias posibles al recorrer un supermercado. Al final de este proyecto se obtiene una calificación del 92,57% de funcionalidad de seguimiento y del 83,33% de reconocimiento de comandos de voz.

Se concluye que el robot diseñado y construido cumple con las metas propuestas para los fines de este proyecto al tener el éxito esperado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El 13.2% de la población total del Ecuador tiene alguna clase de discapacidad, y un 4% de esta población tiene discapacidades físicas según estudios realizados por el ICEVI (Cazar Ramiro, 2011)¹, por lo que es alarmante la cantidad de personas que necesitan de cuidados especiales y de un entorno apto para el desarrollo de sus actividades con normalidad. La Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) en enero del 2007 realizó el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2010 con objetivos que al cabo de dos años serían modificados para dar paso al desarrollo del Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013. Uno de sus objetivos es mejorar la calidad de vida de todos los pobladores, tomando en cuenta que las personas discapacitadas conforman un gran porcentaje de la población por lo que se han implementado distintas acciones para mejorar su entorno ofreciendo ayudas técnicas y tecnológicas.

En los últimos años se han estado desarrollado diferentes tecnologías para ayudar a las personas discapacitadas a desenvolverse con mayor facilidad en su vida diaria. Como ejemplos se tiene las sillas de ruedas eléctricas (Figura 1.1), que poco a poco han ido mejorando su tecnología y sus características, para brindar mayores prestaciones que permitan, por ejemplo, una mayor autonomía para poder utilizarlas durante un tiempo más prolongado, o aumentar la capacidad de peso que soportan las mismas.



Figura 1.1 Silla de ruedas motorizada.

FUENTE: Jazzy, Silla de ruedas eléctrica Jazzy Select 14.

Recuperado de: <http://www.pridemobility.com/jazzy/jazzyselect14.asp>, Inglés, 2012.

Una de las actividades diarias que una persona realiza con normalidad y que se dificulta para una persona con discapacidades físicas, es el realizar compras en un supermercado. Es por ello que se han desarrollado vehículos eléctricos para realizar compras (Figura 1.2), el cual fue inventado en 1968 por Allan R. Thieme en Bridgeport, en la ciudad de Michigan. Este vehículo ha ido mejorando su tecnología y en la actualidad se maneja igual que una motoneta y permite a la persona realizar esta actividad con comodidad. En el Ecuador se utilizan estos vehículos en algunos locales comerciales, para ayudar a personas de la tercera edad o para aquellas que simplemente tengan alguna dificultad para recorrer el establecimiento.



Figura 1.2 Escúter para compras.

FUENTE: Myamigo, Escúter para compras Myamigo RD.

Recuperado de: <http://www.myamigo.com/all-mobility-scooters-products.html>, Inglés, 2012.

En el año 2006, un estudiante graduado en ingeniería mecánica de la Universidad de Florida creó un carrito de compras que sigue a una persona por el centro comercial, llamado Sirviente Inteligente Operado por Batería "B.O.S.S." (Murph, 2006)² (Figura 1.3) por sus siglas en inglés. Este sistema utiliza varios sensores, entre ellos un sensor de color, que reconoce una pieza de tela el cual debe portar el comprador atrás suyo para que B.O.S.S. lo pueda reconocer y realizar el seguimiento.



Figura 1.3 B.O.S.S utilizado en un centro comercial.

FUENTE: <http://www.engadget.com> "B.O.S.S. shopping cart follows you around"

Posteado por Darren Murph en Agosto 11 del 2006.

Podemos darnos cuenta de la tecnología que se ha estado implementando para mejorar la calidad de vida de las personas discapacitadas, como ejemplo tenemos el caso de Luis de Matos que hace una década ha vivido en carne propia lo difícil que es para una persona discapacitada el realizar con normalidad actividades como el de ir de compras a algún supermercado o librería. Motivado por su discapacidad y aprovechando que hoy en día existe la tecnología necesaria para resolver este gran problema al que se enfrentan las personas discapacitadas a diario, se crea en el departamento de informática de la Universidad Interior de Iberia en Portugal, el primer prototipo de un carrito de compras autónomo llamado wi-GO (Figura 1.4), el cual sigue a la persona

discapacitada en su recorrido por el supermercado, facilitando esta actividad al usuario en su mayoría. Sin embargo, las mejoras y actualizaciones para el carrito de compras se verían desde junio del 2011 donde Microsoft lanza el sensor Kinect para Windows, el cual es exclusivamente compatible con el uso de computadora, además de tener licencia para poder ser comercializado legalmente.



Figura 1.4 Wi-GO con su creador Luis de Matos

FUENTE: <http://inovatic.blogspot.com/2012/11/wi-go-shopping-cart-that-follows-you.html>, Inglés, 2012

Actualmente existen varios proyectos realizados con ayuda de este sensor Kinect en diferentes campos y aplicaciones. Después de aproximadamente 8 meses del lanzamiento de este dispositivo, Microsoft ofreció el potencial para transformar como ahora las personas interactúan con computadoras y dispositivos embebidos de Windows, en múltiples industrias, incluyendo educación, cuidado de la salud, transporte, etc. a través de la liberación de librerías SDK Kinect para Windows, las cuales permiten la manipulación de los sensores y la extracción de la información digital que este recepta.

Este dispositivo cuenta con sensores de profundidad y una matriz de micrófonos, los cuales detectan imágenes y sonidos con los que se traslada lo real a lo digital, además los sensores detectan al cuerpo humano por medio de un

sistema de reconocimiento de esqueleto y también tiene funciones de reconocimiento de voz.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años la tecnología ha ido creciendo a pasos agigantados, teniendo como resultado tecnología de calidad con precios cada vez más reducidos. Dentro de estos avances se ha considerado a las personas discapacitadas, de manera que se han desarrollado diferentes dispositivos con nuevas tecnologías para mejorar su calidad de vida.

El olvidar a este sector de la población sería algo inaceptable porque sería una degradación hacia ellos. Son personas comunes y corrientes que tienen grandes capacidades, sin embargo necesitan de ciertas herramientas para desenvolverse con normalidad.

Si consideramos la preocupación sobre este sector de la población por parte del gobierno, tenemos que revisar el tercer objetivo del Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013 (SENPLADES, 2009)³ "Mejorar la calidad de vida de la población", donde en algunas políticas planteadas, tienen como objetivo impulsar el desarrollo de las personas discapacitadas y el mejoramiento de la calidad de vida de las mismas.

El presente proyecto de grado aporta justamente al mejoramiento de la calidad de vida de las personas discapacitadas, enfocándose en una actividad que es una necesidad básica para cualquier persona normal en la actualidad, realizar compras en un supermercado, papelería o local comercial que disponga de carritos de compra. La idea es diseñar y construir un prototipo de robot asistente que facilite esta actividad a personas discapacitadas. Para ello el carrito seguirá a la persona, eliminando la necesidad de empujar al carrito para llevar los productos que la persona desee comprar en dicho local.

1.3 ALCANCE DEL PROYECTO

Diseñar y construir un prototipo de robot asistente cuatricar de simple tracción, utilizando el dispositivo de adquisición y procesamiento de imágenes y sonido Microsoft Kinect para Windows, programando el software utilizando las librerías liberadas de desarrollo para Kinect en lenguaje C#. El robot asistente tiene como función el seguimiento por medio de esqueletización de una persona discapacitada en silla de ruedas, además tiene funciones de reconocimiento de comandos de voz para iniciar y terminar el seguimiento de la persona discapacitada en silla de ruedas. La estructura puede soportar solamente su propia carga, debido a que es un prototipo y por lo tanto se utilizan componentes que ayuden a cumplir únicamente este propósito. El diseño físico del prototipo se lo realiza basándose en las características y alcances físicos de una persona discapacitada en silla de ruedas. Este prototipo funciona solamente en superficies planas y no atraviesa ningún tipo de obstáculos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de robot cuatricar asistente de simple tracción para personas discapacitadas utilizando el dispositivo Kinect para Windows.

1.4.2 ESPECÍFICOS

- Analizar las características de movimiento y alcance físico de una persona en silla de ruedas.

- Realizar el diseño mecánico, eléctrico y electrónico de un prototipo de robot asistente, mediante software para análisis mecánico y software para diseño de placas electrónicas.
- Utilizar las librerías liberadas de Kinect para Windows, con el fin de manejar las funciones de seguimiento de esqueleto y reconocimiento de voz del mismo.
- Desarrollar un programa para controlar los diferentes movimientos del robot asistente, basándose en los datos adquiridos.

1.5 METODOLOGÍA

El proyecto de tesis se desarrollará utilizando la metodología científica siguiendo sus respectivas etapas de análisis, diseño, implementación y evaluación.

- Análisis: Se investigará la antropometría¹ de una persona en silla de ruedas además de los movimientos posibles de la persona y los espacios necesarios para realizar estos. Además se analizará y calculará las características de los diferentes componentes como motores, alimentación eléctrica (basándose tanto en las especificaciones de Kinect para Windows como en los motores a utilizarse) y mecanismos para movimiento, de estos se seleccionarán los más adecuados basándose en peso, tamaño y características mecánicas.
- Diseño: Basándose en los datos de antropometría de una persona en silla de ruedas se realizará el diseño inicial de la estructura, los cuales establecerán las dimensiones del robot asistente. Los datos de peso, tamaño y forma de los componentes, además de los relacionados con el

¹ *Antropometría* es la ciencia que estudia las medidas del cuerpo humano con el fin de establecer diferencias entre individuos, grupos, razas, etc. Las dimensiones del cuerpo humano varían de acuerdo al sexo, edad, raza, nivel socioeconómico, etc.; por lo que esta ciencia dedicada a investigar, recopilar y analizar estos datos, resulta una directriz en el diseño de los objetos y espacios arquitectónicos.

movimiento de la persona discapacitada permitirán diseñar la estructura para que sea mecánicamente resistente. En cuanto al diseño electrónico, los motores y alimentación serán los elementos definitorios, para el desarrollo del diseño de la placa electrónica y de los demás componentes necesarios.

- Implementación: Se construirá la estructura basándose en el diseño. Se fabricará la placa electrónica respectiva. Se programará el microcontrolador como interfaz de comunicación entre el computador y los motores. Se integrarán todos estos componentes y se programará el sensor Kinect para el funcionamiento del prototipo de robot asistente.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO DEL ROBOT

2.1 DESCRIPCIÓN

Según el “Libro Blanco de la Robótica”⁴ desarrollado por el comité español de automática en el año 2008, detalla que los sectores de la robótica son:

- Los robots en la industria del automóvil.
- Los robots en las PYMES.
- Los robots en sectores de compleja robotización.
- Uso de los robots para los servicios de los ciudadanos.

Es así que este sector de robots para los servicios de los ciudadanos, ha tomado el nombre de robótica de servicio, el cual poco a poco ha ido ganando campo en el mundo de la robótica con diferentes aplicaciones. De esta manera se han generado nuevos retos tecnológicos entre los cuales se puede detallar:

- Robots desarrollando actividades en trabajos de exteriores, bosques, agricultura, limpieza, transporte, construcción.
- Robots de asistencia personal, ayuda a labores del hogar, asistencia a personas mayores y discapacitadas.
- Robots en aplicaciones de seguridad civil, como robots que actúen en la lucha contra el fuego, misiones de rescate, monitorización del entorno, patrulleras de costa y fronteras, etc.

2.1.1 ROBÓTICA DE SERVICIO

La Federación Internacional de Robótica (IFR) define a un robot de servicio como:

“aquel que opera de forma parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura” (Internation Federation of Robotics, 2012)⁵.

Dentro de este sector de la robótica se destacan los siguientes servicios:

- Servicios personales:
 - Tareas del hogar.
 - Asistencia personal.
 - Cuidados de niños, ancianos y discapacitados.
 - Educación y entretenimiento.
 - Seguridad personal y en el hogar.
- Servicios en oficinas.
 - Recepción.
 - Seguridad y vigilancia en oficinas.
 - Limpieza.
 - Asistencia de oficinas.
 - Manipulación de documentos.
- Medicina y cuidados:
 - Medicina quirúrgica.
 - Atención hospitalaria.
 - Rehabilitación.
 - Ayuda a personas discapacitadas.
- Servicios productivos.
 - Agricultura.
 - Minería.
 - Construcción.
 - Naval.
 - Logística.

- Servicio de seguridad nacional.
 - Vigilancia de fronteras, costas y aeropuertos.
 - Localización y desactivación de explosivos.
 - Robots de rescate y lucha contra el fuego.
 - Servicios militares.

El prototipo de robot que se diseñará y construirá tiene como objetivo principal asistir a una persona discapacitada, mientras esta realiza compras en un supermercado o local comercial. De esta manera ayuda a la persona discapacitada a evitar la difícil tarea de arrastrar un carrito de compras, mientras se moviliza en su silla de ruedas. Por lo tanto de los servicios indicados anteriormente, este robot forma parte de los siguientes servicios:

- Cuidados de niños, ancianos y discapacitados:

Las aplicaciones de este servicio son robots que permiten resolver tareas diarias como por ejemplo comer, beber, aseo personal, traslado de discapacitados sin necesidad de utilizar silla de ruedas, etc. Estos robots son normalmente portátiles y están equipados con sistemas de movimiento en y entre las habitaciones a base de ruedas o conectores en las paredes, su interacción con las personas está en función de su nivel cognitivo y físico: por voz, gestual, mediante menús en la pantalla o joystick, todo ello de forma inalámbrica.
- Ayuda a personas discapacitadas:

Una de las aplicaciones de este servicio son los robots asistenciales, los cuales están destinados a auxiliar en sus actividades diarias a aquellas personas que carecen de la movilidad necesaria para su autonomía, precisando de una manera casi permanente del familiar o del asistente social para auxiliarle en estas actividades.

El prototipo de robot entonces entraría dentro de las aplicaciones de robot asistente, debido a que ayuda a resolver una actividad diaria a personas que tendrían dificultad en realizarla. En sí enfocado a personas discapacitadas en sillas de ruedas que tendrían la mayor problemática al intentar realizar esta tarea.

2.1.2 ESTUDIO DE LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ.

En este capítulo se tratará las limitaciones de las personas discapacitadas, analizando las dificultades y problemas que llevan el realizar actividades diarias. Además se analizará su antropometría, la cual influye directamente en las dimensiones del robot asistente.

2.1.2.1 Discapacidad motriz⁶

La movilidad limitada es la que presenta una persona a causa de una secuela, manifiesta alteraciones generales o específicas, dificulta el desplazamiento de las personas, haciéndolo lento y difícil, algunas veces no es visible y en otras se requiere de apoyos especiales tales como: aparatos ortopédicos, bastón, muletas, andadera, silla de ruedas o prótesis.

Los principales problemas que puede generar la discapacidad motriz son varios, entre ellos podemos mencionar: movimientos incontrolados, dificultades de coordinación, alcance limitado, fuerza reducida, habla incomprensible, dificultad con la motricidad fina y gruesa, mala accesibilidad al medio físico.

2.1.2.2 Limitaciones de una persona con discapacidad motriz

Dentro de lo que son las limitaciones de una persona con discapacidad motriz, se analizan varios tipos y se detallan los que inciden en la construcción del robot. En la Figura 2.1 se muestra en un gráfico estas limitaciones.



Figura 2.1 Limitaciones de una persona con discapacidad motriz.

FUENTE: Elaboración propia.

Existen varias limitaciones que dificultan la realización de actividades diarias a personas con discapacidad motriz. Las limitaciones se pueden superar con herramientas de apoyo que ayuden a la persona discapacitada a tener un nuevo estilo de vida, el cual le permita disfrutar de actividades que las personas de facultades comunes podrían realizar.

En el caso de este proyecto de tesis vamos a tener en cuenta varias de estas limitaciones para poder superarlas de cierta manera. Así, limitaciones físicas como el de no poder realizar acciones con sus extremidades superiores y al mismo tiempo el de trasladarse, por ejemplo, el empujar un carrito de compras mientras se traslada en su silla de ruedas al mismo tiempo, no será limitación para una persona discapacitada.

Cuando una persona discapacitada realiza actividades diarias en ambientes activos antes considerados penosos por la sociedad debido a su dificultad, el impacto social en ellos es positivo. Al integrar a una persona discapacitada a estos ambientes la persona se siente parte de esta sociedad, se siente parte del sector común, al realizar estas actividades sin ninguna limitación esta persona está siendo sin duda parte de la sociedad, ayudando a que la limitación social se desvanezca en cierto grado.

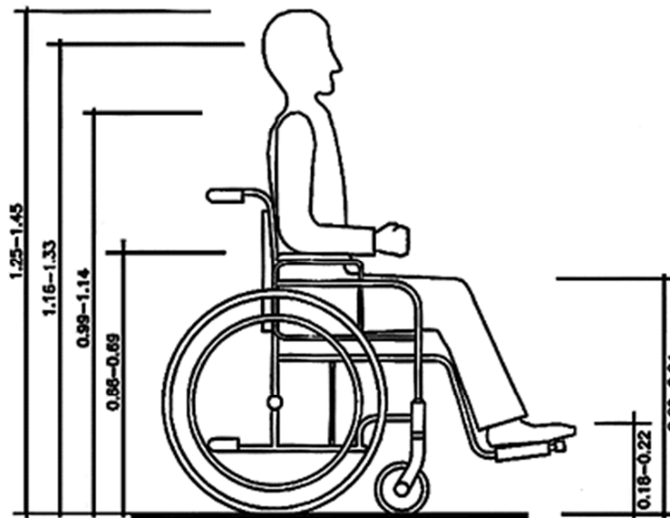
La limitación psicológica, considerada la más importante por la depresión que surge en una persona discapacitada al sentirse excluida de la sociedad, se debe a que siente que no es capaz de realizar actividades de la vida diaria por su propia cuenta. Por lo que es muy importante, para ayudar a que las personas discapacitadas salgan de esa depresión, entregarles herramientas adaptables a sus limitaciones, y así sean capaces de realizar estas actividades por ellos mismos.

2.1.2.3 Antropometría, alcances y velocidad de una persona con discapacidad motriz

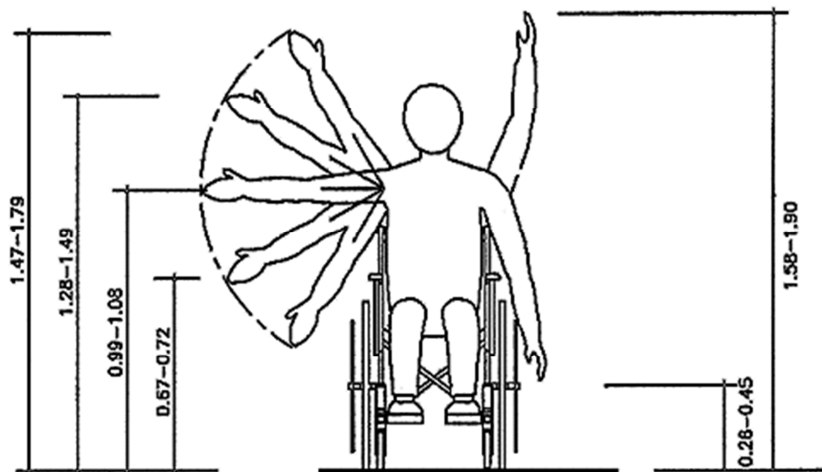
Debido al enfoque de este proyecto a las personas con discapacidad motriz usuarias de sillas de ruedas, se analizará la antropometría y los alcances de este grupo en particular.

2.1.2.3.1 Antropometría

A continuación se muestran las medidas de altura de una persona con discapacidad motriz usuaria de una silla de ruedas, tanto de partes específicas de su cuerpo, como, de sus brazos extendidos a diferentes grados de altura. Las medidas mostradas en la Figura 2.2 están en metros.



(a)



(b)

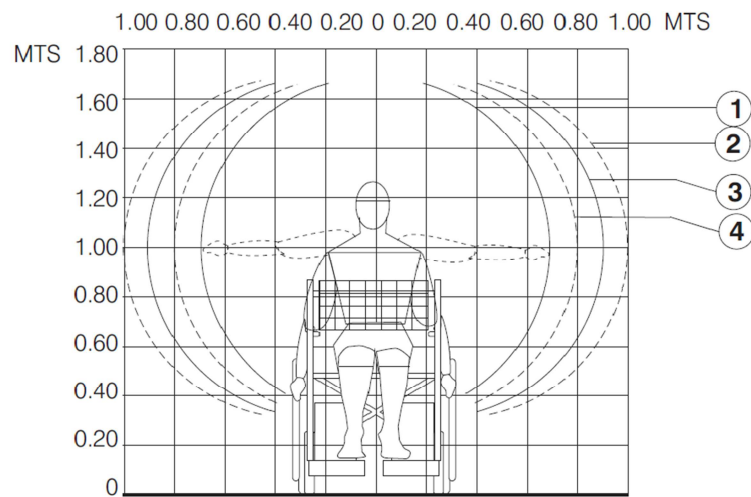
Figura 2.2 Antropometría de persona en silla de ruedas. (a) Vista Lateral. (b) Vista Frontal.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas. Accesibilidad para discapacitados – Un manual de diseño para un ambiente sin libre de barreras. Recuperado de: <http://www.un.org/esa/socdev/enable/designm/AD5-02.htm>, Español, 2012.

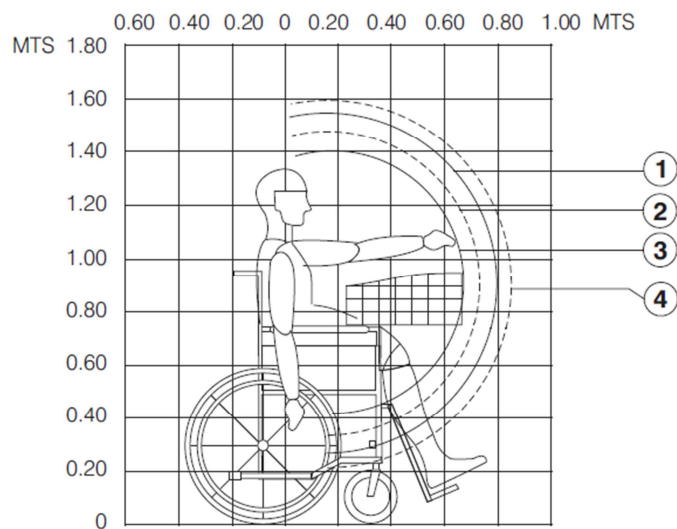
2.1.2.3.2 Alcances

Estas medidas son en sí los alcances de una persona usuaria de silla de ruedas, los cuales se detallan a continuación según las siguientes especificaciones:

1. Zona de alcance con la espalda recta.
2. Hombres.
3. Mujeres.
4. Zona de alcance con el cuerpo inclinado.



(a)



(b)

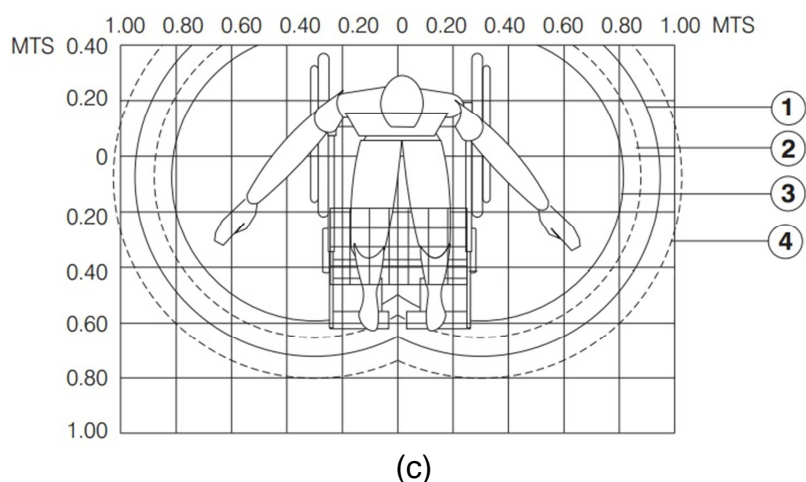


Figura 2.3 Zona de alcance de persona en silla de ruedas. (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral. (c) Vista Superior.

Fuente: Instituto Mexicano de Seguro Social. Criterios de Proyecto de Arquitectura para la Accesibilidad de las Personas con Discapacidad. 3era edición. México D.F. 2011.

2.1.2.3.3 Velocidad

La velocidad de una persona en silla de ruedas depende de varios factores, como por ejemplo de si está en una silla de ruedas motorizada o una silla de ruedas manual. En cualquiera de los anteriores casos la velocidad es variable, en la silla de ruedas motorizada puede haber cambios de velocidades, generalmente entre lento, medio y rápido, mientras que en una silla de ruedas manual, la velocidad dependerá de la fuerza que la persona en la silla de ruedas aplique a las ruedas de manejo.

Se han hecho estudios dedicados a esta temática para poder realizar aplicaciones enfocadas para personas discapacitadas usuarias de sillas de ruedas, como por ejemplo, para determinar el tiempo de duración de un semáforo para que una persona discapacitada pueda cruzar la calle a una velocidad adecuada sin tener ninguna dificultad.

El documento “Accesibilidad en los Espacios Públicos Urbanizados” (Ministerio de vivienda del Gobierno de España, 2010)⁷ realizado por el Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, nos muestra las diferentes características de los semáforos que se deben regular para los cruces peatonales, entre estas

características se encuentra la velocidad mínima de paso. Esta velocidad queda regulada en un intervalo entre 0,5 m/s y 1 m/s dependiendo de la localización.

2.2 CARACTERÍSTICAS

Desde este momento en adelante al prototipo de robot asistente se lo llamará “RAD4-23” por sus siglas en español (Robot Asistente para Discapacitados), y a la persona con discapacidad física que utilice silla de ruedas para la cual será diseñado y construido el RAD4-23 se lo llamará usuario, excepto cuando sea necesario nombrar la discapacidad para denotar alguna característica de la misma.

Para determinar las características del RAD4-23 es necesario entender las necesidades del cliente (usuario) en términos de los atributos del producto, para que estos se traduzcan en especificaciones apropiadas a las características de ingeniería. Como característica inicial indicamos que la manera en que el RAD4-23 asistirá al usuario es siguiendo al mismo, para que este no tenga que empujarlo.

2.2.1 MÉTODO DE DESPLIEGUE DE LA FUNCION DE CALIDAD (QFD)

El QFD (Yacuzzi Enrique, 2008)⁸ por sus siglas en inglés (Quality Function Deployment) muestra los requerimientos del cliente tanto en el proceso de diseño, manufactura y marketing. Este método nos permite lograr la correspondencia entre estos requerimientos con las características de ingeniería y además nos permite conocer las relaciones que pueden existir entre las diferentes características técnicas de diseño. De esta manera podremos obtener las características técnicas más relevantes y a partir de estas obtener las especificaciones iniciales para el diseño del RAD4-23. Este proceso se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Proceso del método QFD.

FUENTE: Elaboración propia.

2.2.1.1 Requerimientos del cliente

Para obtener estos requerimientos, se preguntó a personas discapacitadas y familiares, como desearían que fuera el producto haciéndoles llegar la idea de que se desea construir un robot asistente que les siga mientras realizan la actividad de comprar. Se analizó los requerimientos del cliente que han destacado como más importantes al momento de dar uso el RAD4-23, los cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Requerimientos del Cliente.

Nº	Requerimientos del cliente
1.	Comodidad para colocar y sacar los productos
2.	Rápido
3.	Alta capacidad de productos
4.	Buena autonomía
5.	Buen aspecto
6.	Seguro
7.	Capacidad de subir rampas
8.	Bajo costo
9.	Silencioso
10.	Fácil de utilizar

FUENTE: Elaboración propia.

2.2.1.2 Características técnicas

Luego de haber obtenido los requerimientos del cliente, pasamos a enlistar las características técnicas que se deberían considerar para el diseño del RAD4-23, tomando en cuenta que las características técnicas tienen que ser de carácter cuantitativo, para realizar el correcto análisis entre estos dos grupos. Además estas características técnicas deben ser seleccionadas para dar solución a los requerimientos del cliente. Estas características se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características Técnicas.

N°	Características técnicas
1.	Dimensiones del RAD4-23
2.	Potencia del motor
3.	Peso del RAD4-23
4.	Consumo de energía
5.	Velocidad del RAD4-23
6.	Relación de salida caja reductora
7.	Resistencia de la estructura
8.	Acabados superficiales
9.	Interfaz amigable con el usuario
10.	Costo de elementos

FUENTE: Elaboración propia.

Estos dos grupos, tanto los requerimientos del cliente, como las características técnicas se las analiza en una matriz de la calidad, donde se podrá obtener como resultado una lista de las características técnicas de acuerdo a la importancia que se le debe dar al momento de diseñar. En esta matriz se da valores de prioridad a los requisitos del cliente, para luego identificar por medio de símbolos el nivel de correlación entre los requerimientos del cliente y las características técnicas. Se utilizan por convenio los símbolos y las valoraciones correspondientes mostrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Simbología para grados de correlación entre Requerimientos del Cliente y Características Técnicas.

Grado de correlación	Símbolo	Valoración
Fuerte	Θ	9
Media	O	3
Débil	Δ	1
Nula	vacío	0

FUENTE: Elaboración Propia.

Con las valoraciones de correlación y el porcentaje de prioridad de los requerimientos del cliente obtenemos el porcentaje de ponderación de las características técnicas, información que se utilizará para el diseño del RAD4-23. De este mismo modo utilizaremos símbolos para determinar el nivel de correlación entre las características técnicas, y así conocer el efecto que un incremento o mejora en una característica técnica tiene sobre las demás, ya que esta es una parte importante en el diseño. La simbología a utilizar se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Simbología para grado de correlación entre Características Técnicas.

Grado de correlación	Símbolos
Positiva fuerte	++
Positiva débil	+
Negativa débil	-
Negativa fuerte	--

FUENTE: Elaboración propia.

Se completa la matriz de esta manera y con conceptos de ingeniería se obtiene lo mostrado en la Figura 2.5.

	Prioridad	Porcentaje de prioridad	Dimensiones del carrito	Potencia del motor	Peso del carrito	Consumo de energía	Velocidad del carrito	Relación de salida caja reductora	Resistencia de la estructura	Acabados superficiales	Interfaz amigable con el usuario	Costo de elementos
Comodidad para colocar y sacar los productos	3	8,3	∅							Δ		
Rápido	4	11,1		∅	∅		∅	∅				∅
Alta capacidad de productos	5	13,9	∅	∅		Δ	∅	Δ	∅			Δ
Buena autonomía	4	11,1		∅	∅	∅	∅	Δ				∅
Buen aspecto	3	8,3	Δ							∅	∅	Δ
Seguro	3	8,3		∅		∅	∅		∅	∅		Δ
Capacidad de subir rampas	2	5,6		∅	∅	∅	∅	∅				∅
Bajo costo	5	13,9	Δ	∅	Δ	∅	∅	Δ	∅	∅	Δ	∅
Silencioso	3	8,3		∅			∅					
Fácil de utilizar	4	11,1									∅	
Ponderación			222,0	483,6	163,9	280,6	366,6	189,2	241,5	149,6	138,7	272,6
Porcentaje de Ponderación			8,9	19,3	6,5	11,2	14,6	7,5	9,6	6,0	5,5	10,9

Figura 2.5 Matriz despliegue de la función de calidad del sistema (QFD).

FUENTE: Elaboración propia.

2.2.1.2 Análisis de resultados de la matriz QFD.

Analizando la matriz despliegue de la función de la calidad, obtenemos los datos de la tabla 2.5, en la cual tenemos por orden de importancia al momento de diseño de las características técnicas, esto basado en los porcentajes de ponderación obtenidos.

Tabla 2.5 Resultados de la matriz QFD.

Orden de diseño	Características técnicas	Porcentaje de ponderación (%)
1.	Potencia del motor	19,3
2.	Velocidad del RAD4-23	14,6
3.	Consumo de energía	11,2
4.	Costo de elementos	10,9
5.	Resistencia de la estructura	9,6
6.	Dimensiones del RAD4-23	8,9
7.	Relación de salida caja reductora	7,5
8.	Peso del RAD4-23	6,5
9.	Acabados superficiales	6,0
10.	Interfaz amigable con el usuario	5,5

FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo a esta tabla se nota que la característica técnica principal por la cual se debe iniciar el diseño es la potencia del motor, la cual incluye la selección del mismo. Este es el elemento más importante debido a que de él depende la velocidad, la capacidad de productos, la capacidad de subir rampas y el costo que esto supone al momento del diseño del RAD4-23.

La velocidad del RAD4-23 está en segundo lugar como característica a la cual se debe dar mayor importancia al momento del diseño, y seguido de ella el consumo de energía. Estas 3 primeras características técnicas se relacionan entre sí al momento de diseñar un vehículo robot, por lo que el diseño del RAD4-23 debe iniciar por la determinación de las especificaciones que dependen de estas características.

2.2.2 ESPECIFICACIONES DEL RAD4-23

Las especificaciones que se detallarán en este capítulo, las cuales parten de los resultados del capítulo 2.2.1.2, serán el punto de partida de diseño del RAD4-23, ya que hay que establecer o por lo menos identificar las especificaciones más importantes en los primeros momentos del proceso de diseño. Al final de este capítulo se construirá una tabla que muestre las mismas. Además es importante

recalcar que las dimensiones del robot aunque están en sexto lugar en el orden de diseño, son esenciales para tener una idea del tamaño del mismo así que se trataran durante este capítulo.

La propuesta de este proyecto es realizar un robot cuatricar de simple tracción, de manera que la primera especificación es que tendrá 4 ruedas, donde las 2 delanteras tendrán cada una un motor para realizar el movimiento del robot, y las 2 traseras serán ruedas locas.

2.2.2.1 Potencia del motor y velocidad del rad4-23.

A continuación calculamos la potencia del motor, la cual está relacionada con la velocidad del robot y el peso del mismo. Este valor de potencia aproximado nos ayudará a la selección del tipo de motor. Para el cálculo de la potencia se utiliza la siguiente expresión.

$$P = F \times V \quad [2.1]$$

Donde:

- P = Potencia
- F = Fuerza.
- V = Velocidad.

La fuerza total necesaria para mover el RAD4-23 se calcula realizando el diagrama de cuerpo libre del robot mostrado en la Figura 2.6 y realizando un análisis dinámico sencillo en el eje X.

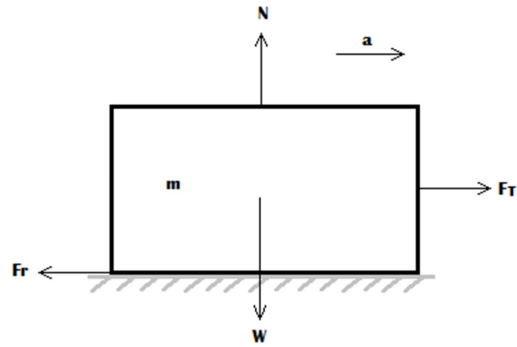


Figura 2.6 Diagrama de cuerpo libre del RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia.

Analizando el diagrama de cuerpo libre y siguiendo las dos primeras leyes de Newton obtenemos las siguientes expresiones:

- Sumatoria de fuerzas en el eje Y.

- Sumatoria de fuerzas en el eje X.

Para el valor de la masa se toma un aproximado de 50Kg, donde se incluyen todos los elementos que posiblemente lleve el RAD4-23, hay que

recalcar que debido a que es un prototipo, se toma en cuenta solamente su propio peso y no el de los productos que deseara llevar el usuario, debido al aumento en el costo que supone la construcción de un robot que cumpla con este requerimiento. Se desea que la reacción del robot al momento de seguir a la persona sea rápida, por lo que la aceleración será de 1m/s^2 . El valor de coeficiente de fricción estático consultado es de 0,8 entre caucho y concreto (The Engineering Toolbox, 2012)⁹. Reemplazando en la ecuación 2.2 tenemos:

$$F_T = 50Kg \times \frac{1m}{s^2} + 0,8 \times 50Kg \times \frac{9,81m}{s^2}$$

$$F_T = 50Kg \times \frac{1m}{s^2} + 0,8 \times 50Kg \times \frac{9,81m}{s^2}$$

$$F_T = 530.4 N$$

Esta fuerza es total, así que la dividimos por 2 debido a que tenemos 2 motores y cada uno entregará fuerza por separado para el movimiento del robot. Entonces:

$$Fm = \frac{F_T}{2} = \frac{530.4N}{2}$$

$$Fm = 265.2N$$

La otra variable para el cálculo de la potencia es la velocidad para la cual elegimos un valor promedio de velocidad del usuario, tratado en el capítulo 2.2.2.3.3, esto debido a que queremos que el robot se mueva aproximadamente a la misma velocidad que el usuario. Este valor está entre 0.5m/s y 1m/s, donde tomaremos el valor de 0.6m/s. Entonces reemplazando la fuerza del motor y la velocidad en la ecuación 2.1 tenemos:

$$P = 265.2N \times \frac{0.6m}{s}$$

$$P = 160\omega$$

Este valor de potencia aumentará en su análisis posterior debido a la eficiencia que pueda tener el motor seleccionado, de manera que asumimos una eficiencia del 60%, hay que considerar que este puede ser un dato variable según el tipo de motor, pero consideramos el peor caso. De manera que tenemos una potencia que aumenta en un 40% es decir:

$$P = 160\omega \times 1,4$$

$$P = 224 \omega$$

2.2.2.2 Consumo de energía

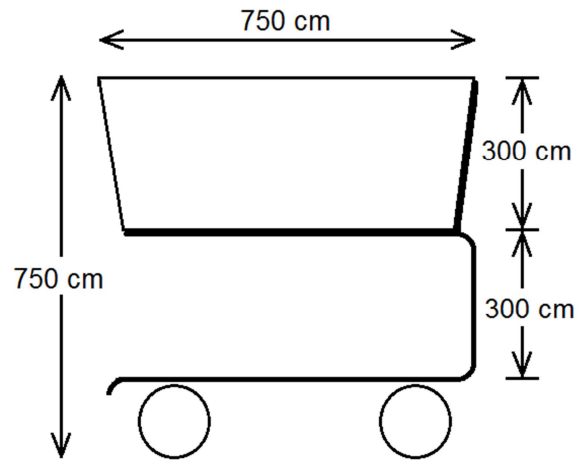
El consumo de energía se analizará posteriormente según la selección del motor, donde es vital la autonomía del RAD4-23. Por lo tanto como especificación para este capítulo se decide lograr una autonomía de 1,5 horas. Considerando para ello especialmente el costo que supone una mayor autonomía.

2.2.2.3 Dimensiones del RAD4-23

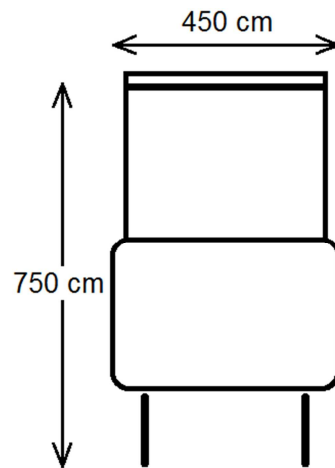
Como base para especificar las dimensiones del robot, se toma en cuenta principalmente la antropometría y los alcances del usuario, tratados en el capítulo 2.1.2.3.1 y 2.1.2.3.2 respectivamente. De manera que la altura del mismo está limitada por la medida del suelo al brazo del usuario, donde se considera específicamente la posición de la mano en un ángulo aproximado de 30 grados con el brazo recto, esta medida tiene un valor entre 57cm y 72cm como se muestra en la Figura 2.1 (b). Además se considera los alcances del brazo con la posición de la espalda recta mostrados en la Figura 2.2 (a).

También se considera la idea principal del proyecto, la cual es construir un robot para asistir al usuario mientras este realiza compras en un centro comercial, por lo que es necesario ubicar una canastilla. Esta canastilla debe tener una profundidad que le permita colocar cómodamente los productos al usuario, entonces la altura del mismo con las consideraciones anteriores será de 30cm.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones se decide dimensionar el robot como se muestra en la Figura 2.7.



(a)



(b)

Figura 2.7 Dimensiones del RAD4-23. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

FUENTE: Elaboración propia.

2.2.2.4 Fijación de especificaciones

Una vez que hemos indicado las características más importantes del robot e indicado sus especificaciones, construimos una tabla de especificaciones como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Tabla de especificaciones.

Nº	Especificación
1	Sistema Cuatricular
2	Tracción delantera
3	Ruedas delanteras con control independiente
4	Ruedas traseras locas
5	Potencia mínima del motor 224 ω
6	Velocidad mínima 0.6 m/s y máxima de 1 m/s.
7	Autonomía mínima 1,5 horas
8	Estructura resistente
9	Alto máximo 75cm
10	Ancho mínimo 45cm
11	Profundidad mínima de la canastilla 30cm
12	Alta capacidad de productos
13	Buen aspecto
14	Seguro
15	Silencioso
16	Fácil de Utilizar
17	Distancia de seguimiento entre el usuario y el robot de 60cm
18	No seguir a otra persona mientras se encuentre en funcionamiento con el usuario

19	Comandos de voz para activación y desactivación del seguimiento
20	Al curvar evitar colisiones con las estanterías
21	No contamine el ambiente

FUENTE: Elaboración Propia

2.2.2.5 Esquematización funcional del RAD4-23

Una vez establecidos los requerimientos del robot es posible determinar las funciones y sub-funciones del sistema. Para ello se utiliza el método de IDEF-0, que modela las actividades de un sistema, derivado del lenguaje gráfico SADT (Structured Analysis and Design Technique por su siglas en inglés) (K. Osman, 2008)¹⁰, dicho método ayuda a organizar el análisis de un sistema y a promover una buena comunicación entre el analista y el cliente.

En general dicho método consta de 2 etapas:

- Determinación de la función principal del sistema.
- Definición de la estructura funcional del sistema mediante funciones parciales o subsistemas.

Tomando en cuenta que cada etapa debe estar ligada mediante interrelaciones lógicas.

2.2.2.5.1 Identificación de la función principal del sistema

En primera instancia para determinar la función principal del sistema, se debe identificar los parámetros de entrada y salida del mismo. Para ello se considera al sistema como tal como una caja negra, donde no importa lo que contiene el sistema, sino lo que se obtiene de él. Para nuestro robot se representa esto en la Figura 2.6.

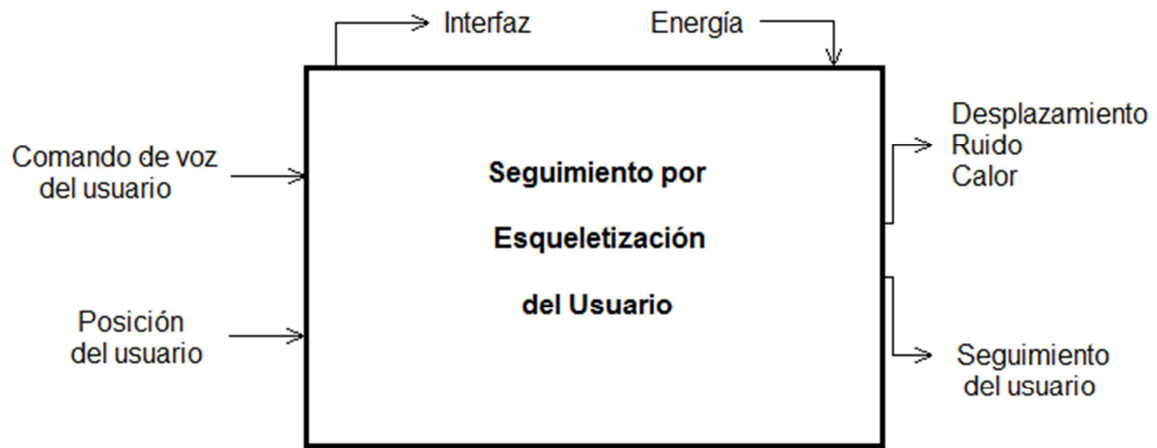


Figura 2.8 Caja negra de la función principal del sistema

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.5.2 Identificación de funciones secundarias.

Una vez determinado la función principal, se detallan las funciones secundarias para lograr la función principal del sistema como se representa en la Figura 2.7.

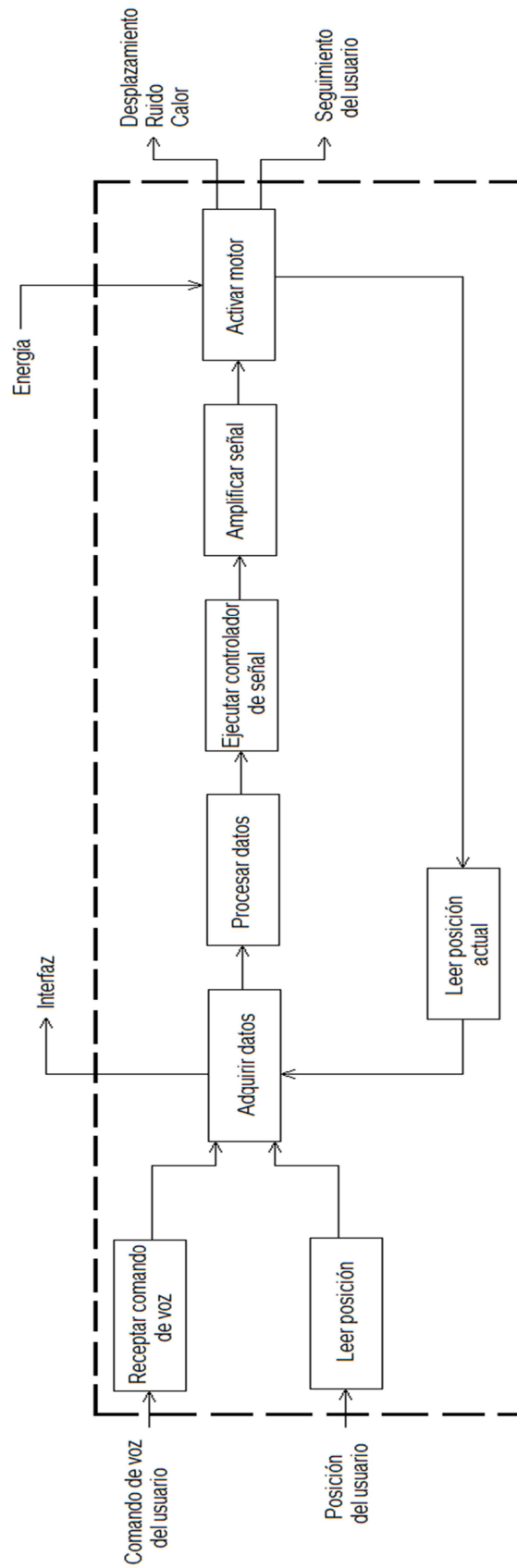


Figura 2.9 Identificación de subsistemas funcionales en el RAD4-23

FUENTE: Elaboración propia.

CAPITULO 3

DISEÑO DEL RAD4-23

3.1 SOLUCIÓN PROPUESTA

Para cumplir con el objetivo principal de este proyecto proponemos como solución un robot móvil terrestre cuatriruco de simple tracción delantera con un motor en cada llanta para realizar giros y dos ruedas locas traseras. El cual conste de un sistema de visión artificial para mediante esqueletización reconocer al usuario y seguir su trayectoria. Además tendrá sensores para detectar objetos y evitar colisiones.

3.2 PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO

Aplicando la metodología de diseño planteada, se sigue el siguiente procedimiento:

- Caracterización del elemento principal.
- División del RAD4-23 en sistemas.
- Diseño electrónico, eléctrico y mecánico de los elementos de cada sistema.
- Resultados del diseño.

Se toma en cuenta que existen elementos que definen características de otros, estos elementos son los que tienen mayor importancia dentro de las características técnicas principales que se muestran en la Tabla 2.5, mientras que existen otros que se pueden diseñar en paralelo debido a que no afectan las características de otros elementos.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO PRINCIPAL

Siguiendo la metodología de diseño propuesta, se inicia el diseño a partir de las características técnicas principales que se muestran en la Tabla 2.5. El elemento que satisface con estas características es el motor, por lo que se inicia con la caracterización del mismo.

3.3.1 ALTERNATIVAS DE MOTORES

La selección del motor se la realizará mediante ciertos conceptos de ingeniería como por ejemplo, fuente de energía necesaria, seguridad, tipo de controlador, ruido, vibración, etc. Para lo que iremos seleccionando y descartando ciertos tipos de motores dependiendo de las características que necesite el RAD4-23.

3.3.1.1 Motor a combustión vs. Motor eléctrico

Para el motor como elemento principal tenemos dos alternativas iniciales, las cuales son el motor a combustión y el motor eléctrico. Sin realizar un análisis muy profundo, podemos tratar las ventajas y desventajas del motor a combustión. Para lo cual tomamos en cuenta los requerimientos del cliente de la Tabla 2.1.

El motor a combustión nos entrega una buena potencia y eficiencia, sin embargo las desventajas para la construcción de un robot, y en este caso más aún para un robot de servicio, lo eliminan como opción debido a las siguientes desventajas:

- Contaminación: Es importante que el robot no contamine el ambiente debido a que se utilizará en espacios cerrados.
- Seguridad: La fuente de energía es inflamable por lo que existen riesgos debido a ello.
- Ruido: El motor a combustión es ruidoso y a su vez genera vibraciones.

- Control: El control de un robot de movimiento con un motor a combustión es complejo.

De manera que el motor del RAD4-23 será eléctrico.

3.3.1.2 Motor de corriente alterna vs. Motor de corriente continua

Dentro de los motores eléctricos tenemos dos alternativas:

- Motor de corriente alterna (AC).
- Motor de corriente continua (DC).

La problemática radica en la fuente de energía, ya que un motor de corriente alterna puede ser trifásico, bifásico o monofásico. Para los dos primeros casos sería costoso y poco práctico construir un robot con una fuente que nos entregue ese tipo de energía. La opción a seleccionar frente a un motor de corriente continua sería el motor monofásico. Así que se realiza una comparación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Comparación entre motor AC y DC.

Característica	Motor AC	Motor DC
Control de Velocidad	Variador de frecuencia	Secuencias o PWM
Fuente	Baterías e Inversor	Baterías
Mantenimiento	Mínimo	Regular
Potencia vs. Costo	Alta	Media
Ruido	Medio.	Bajo.

FUENTE: Elaboración propia.

Para la construcción del RAD4-23 son muy importantes dos puntos en específico, el control del motor y la fuente, esto debido a que es un vehículo y son estas las más influyentes. Como podemos notar en la Tabla 3.1 el motor DC tiene un control mucho más sencillo que el de un motor AC, ya que el generar secuencias para un motor a pasos o PWM para un servomotor o motor universal DC resulta más sencillo.

Con respecto a la fuente de energía, el motor AC necesita un inversor además de las baterías para así obtener la corriente alterna, el motor DC necesita solamente las baterías según el voltaje nominal que necesite el motor. De manera que el costo de la fuente sería menor para un motor DC que para un motor AC. Además se considera que el ruido debe ser el mínimo posible como requerimiento del usuario en el capítulo 2.2.1.1.

Por lo tanto el motor del RAD4-23 será de corriente continua.

3.3.1.3 Motores de corriente continua

Existen varios tipos de motores que funcionan a través de corriente continua, estos se diferencian por el control de velocidad o posición, lo que le da a cada uno diferentes características que los convierten en una buena alternativa dependiendo de la aplicación. Para seleccionar que tipo de motor se utilizará se analiza el método de control de velocidad y su costo.

3.3.1.3.1 Motor a pasos

Este tipo de motor tiene su control a través de secuencias que generan los “pasos” (mínimo giro que tiene un motor a pasos), el cual varía según el tipo de motor o de la secuencia que se utilice. El motor a pasos es una gran alternativa en proyectos que exijan precisión y un control más exacto de la posición del giro del rotor, por lo que en nuestro proyecto sería una alternativa descartable debido al objetivo principal del RAD4-23 que es el de asistir al cliente a donde este se desplace, sin importar una alta precisión del giro de los motores, la única función

que los motores deben realizar es el de movilizar el RAD4-23 de una posición inicial a una posición final sin ser tan importante la precisión que estos ofrezcan. Además este tipo de motores tienen un precio elevado respecto a su potencia.

3.3.1.3.2 Servomotor

El servomotor es un motor eléctrico que tiene la capacidad de ser controlado, tanto en velocidad como en posición. Para ello se necesita generar una señal de PWM a una frecuencia especificada por el fabricante y según el ancho de pulso este girará en un sentido o en el otro y a una velocidad proporcional al ancho de pulso. Este ancho de pulso también está especificado por el fabricante. Esta sería una opción buena debido al control de velocidad que va a ser necesario, sin embargo el precio de este tipo de motores es elevado.

3.3.1.3.3 Motor con escobillas

Este tipo de motor no tiene un control de velocidad incorporado, sin embargo es posible controlar su velocidad a través de su alimentación. Cuando es alimentado con su voltaje nominal y sin carga este gira a su velocidad máxima, y para cambiar la velocidad se aplica PWM a su alimentación en vez de alimentación continua, esto a altas frecuencias. De esta manera se reduce la potencia del motor, lo cual reduce su velocidad. Este tipo de motores tiene un costo menor respecto a las opciones antes presentadas, y cumple con las características necesarias para el movimiento del RAD4-23.

3.3.1.4 Comparación entre tipos de motores de corriente continua

Además de las características mencionadas de cada alternativa, también tomamos en cuenta que para los giros optamos como solución utilizar tracción delantera con un motor para cada rueda. De esta manera podemos realizar

trayectorias curvas al controlar los motores a diferentes velocidades, o para giros bruscos un motor gira en dirección contraria al otro según el sentido en el que se desee girar. Por ello en los tipos de motores a utilizar se busca tener un fácil control de velocidad y cambio de giro, además de las características obtenidas por las necesidades del usuario.

Tabla 3.2 Comparación entre alternativas de motores de corriente continua.

Característica	Motor a pasos	Servomotor	Motor DC con escobillas
Precisión	Alta	Media	Baja
Controlador de velocidad y cambio de giro	Driver para motor a pasos	Servo driver	Puente H
Precio	Alto	Alto	Bajo

FUENTE: Elaboración propia.

3.3.2 ALTERNATIVA SELECCIONADA

Como ya se explicó la precisión no es de gran relevancia al momento del movimiento del robot, puesto que nos interesa seguir al usuario sin importar una alta precisión en el movimiento. Analizando entonces la Tabla 3.2 se selecciona un motor de corriente continua con escobillas, ya que este satisface las necesidades del cliente y tiene un control de velocidad y sentido de giro al costo más reducido.

3.4 SISTEMAS QUE CONFORMAN EL RAD4-23

El contexto general del diseño del RAD4-23 se dividió en 4 sistemas principales:

- Motriz y Estructura.
- Seguimiento y control.

- Detección.
- Alimentación.

Cada uno de estos sistemas tiene elementos que forman parte del diseño tanto eléctrico, electrónico como mecánico. En este capítulo se mostrarán los sistemas primero de manera general para después desarrollarlos dentro del diseño. Es necesario recalcar que existen ciertas características de un sistema que sirven como dato para el diseño de elementos de otro sistema, por ejemplo, la corriente de consumo de un componente es un dato necesario para el diseño dentro del sistema de alimentación.

3.4.1 SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA

Este sistema es el encargado del movimiento del robot y del soporte para todos los elementos. Dentro de este sistema se encuentra el motor que es el elemento principal del diseño del RAD4-23.

3.4.1.1 Caracterización

El sistema motriz y estructura está conformado por:

- Motores.
- Controlador de motores.
- Estructura.
- Tipo de tracción.
- Cajas reductoras.
- Llantas traseras.
- Llantas delanteras.

Estos elementos se relacionan como se muestra en la Figura 3.1.

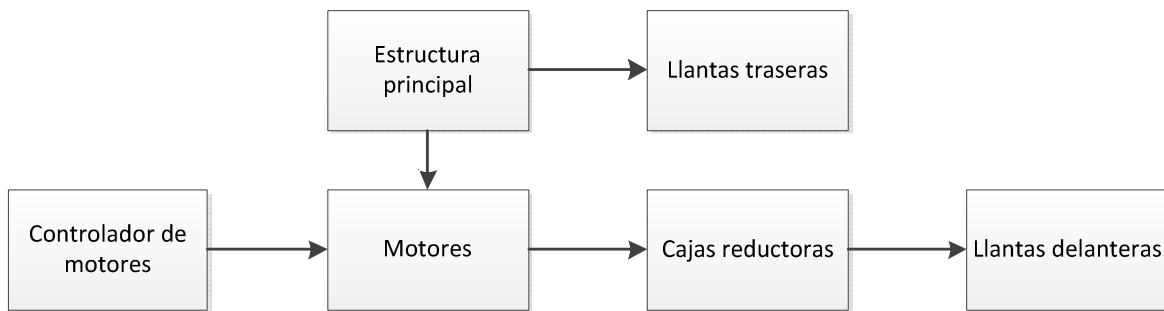


Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema motriz y estructura.

FUENTE: Elaboración propia.

El controlador de motor maneja la velocidad y sentido de los motores, estos transmiten la energía a su respectiva caja reductora y estas a su vez a cada llanta delantera. Además se tiene la estructura principal la cual está conectada al motor y las llantas traseras conectadas a esta estructura.

3.4.1.2 Elementos

A continuación se muestran los elementos que conforman el sistema motriz y estructura enfocados tanto desde el punto de vista de diseño electrónico y mecánico. Se trata primero el diseño del motor por ser el elemento principal.

- Diseño eléctrico.
 - Motores.
- Diseño electrónico.
 - Controlador de motores.
- Diseño mecánico.
 - Estructura principal.
 - Cajas reductoras.
 - Tipo de tracción.
 - Sujeción de motores.
 - Llantas delanteras.
 - Ruedas locas traseras.

3.4.2 SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

Este sistema es el encargado de reconocer al usuario, analizar su posición respecto al robot y decidir el movimiento del robot.

3.4.2.1 Caracterización

El sistema de seguimiento y control está conformado por:

- Dispositivo de visión artificial.
- Computador
- Microcontrolador
- Controlador de motores

Estos elementos se relacionan como se muestra en la Figura 3.2.

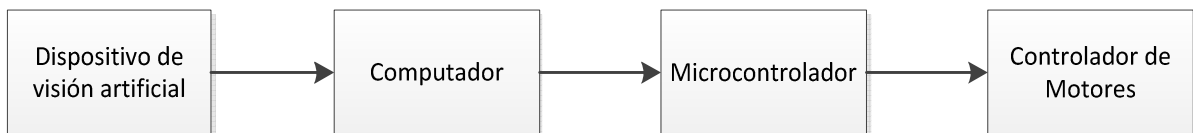


Figura 3.2 Diagrama de bloques del sistema de seguimiento y control.

FUENTE: Elaboración propia.

El dispositivo de visión artificial recibe los datos de la posición del usuario al computador. El computador se encarga de recibir estos datos y evaluar la posición del usuario para tomar las decisiones del movimiento de los motores. Este envía las órdenes al microcontrolador y el microcontrolador se encarga de manejar el controlador de motores para realizar el movimiento que sea necesario.

3.4.2.2 Elementos

Los elementos que conforman el sistema de seguimiento y control enfocados tanto desde el punto de vista de diseño electrónico y mecánico se muestran a continuación:

- Diseño electrónico.
 - Dispositivo de visión artificial.
 - Computador.
 - Microcontrolador.
 - Controlador de motores.
- Diseño mecánico.
 - Sujeción del dispositivo de visión artificial.
 - Protección del dispositivo de visión artificial.
 - Carcasa de sujeción para el computador.
 - Sujeción del microcontrolador.
 - Sujeción del controlador de motores.

3.4.3 SISTEMA DE DETECCIÓN

Adicionalmente a la adquisición de la posición del usuario, es necesario detectar los objetos cercanos al robot, para evitar colisiones durante el movimiento, por esta razón es necesario agregar sensores para medir constantemente las cercanías del RAD4-23. El sistema de detección reconoce obstáculos en la parte delantera del RAD4-23 para evitar colisiones durante el movimiento y en la parte trasera del robot para evitar colisiones al momento de realizar los giros.

3.4.3.1 Caracterización

El sistema de seguimiento y control está conformado por:

- Sensores.
- Microcontrolador.
- Computador.

Estos elementos se relacionan como se muestra en la Figura 3.3

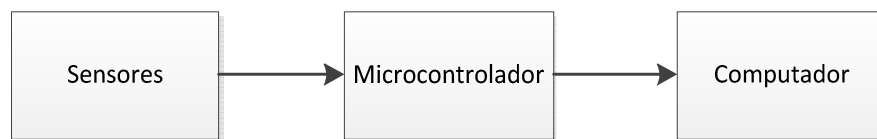


Figura 3.3 Diagrama de bloques del sistema de detección.

FUENTE: Elaboración propia.

Los sensores enviarán las señales al microcontrolador, las mismas que serán enviadas al computador para ser evaluadas y tomar decisiones en caso de un objeto cercano. El sistema de seguimiento y control es el encargado de enviar la información al microcontrolador para manejar los motores.

3.4.3.2 Elementos

Los elementos que conforman el sistema de detección enfocados tanto desde el punto de vista de diseño electrónico y mecánico se muestran a continuación:

- Diseño electrónico.
 - Sensores.
- Diseño mecánico.
 - Soporte de los sensores delanteros.
 - Estructura de los sensores delanteros.
 - Estructura de los sensores traseros.

El microcontrolador y el computador son tratados en el diseño del sistema de seguimiento y control.

3.4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Este sistema es el encargado de proveer energía a todos los elementos eléctricos y electrónicos, además de brindar las protecciones eléctricas.

3.4.4.1 Caracterización

El sistema de alimentación está conformado por:

- Fuente para motores.
- Fuente para computador.
- Fuente para microcontrolador.
- Fuente para altavoz.
- Fuente para dispositivo de visión artificial.
- Fuente para sensores.
- Batería.

Estos elementos se relacionan como se muestra en la Figura 3.4

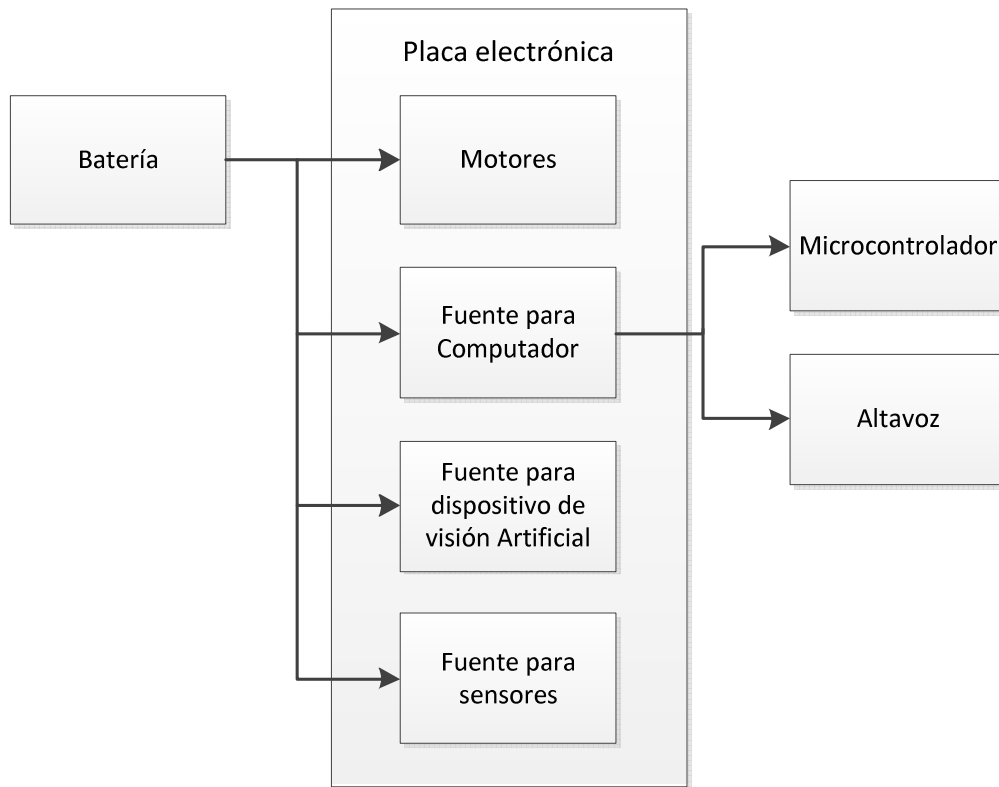


Figura 3.4 Diagrama de bloques del sistema de alimentación.

FUENTE: Elaboración propia.

El sistema de alimentación parte de la batería hacia los diferentes elementos que se van a alimentar, los cuales son motores, computador, dispositivo de visión artificial y sensores. El computador supe de energía al microcontrolador y al altavoz a través del puerto USB.

3.4.4.2 Elementos

Los elementos que conforman del sistema de alimentación enfocados tanto desde el punto de vista de diseño electrónico y mecánico se muestran a continuación:

- Diseño eléctrico.
 - Batería.
 - Cargador de batería.

- Fuentes.
- Diseño electrónico.
 - Placa electrónica para conexión de elementos.
- Diseño mecánico.
 - Fijación de batería.
 - Sujeción de la placa electrónica.

3.5 DISEÑO DE SISTEMAS

En este capítulo se desarrolla el diseño eléctrico, electrónico y mecánico de cada uno de los elementos dentro de cada sistema. Para el diseño de los diferentes sistemas tomamos como referencia la terminología de la lista a continuación:

- I_M : corriente del motor.
- i : coeficiente de relación de la caja reductora.
- y_{max} : deformación máxima
- L : longitud de las platinas.
- a : ancho de las platinas.
- e : espesor de las platinas.
- E : módulo de elasticidad.
- ρ : densidad.
- I : área momento de inercia.
- F : fuerza
- τ : torque
- m_B : masa de la batería grande.
- m_K : masa del Kinect.
- $m_{cobertor}$: masa del cobertor del Kinect.
- m_C : masa del computador.
- m_c : masa de la canastilla.
- m_P : masa de los productos.

- m_{EK} : masa de la estructura para el Kinect.
- m_{EC} : masa de la estructura de la computadora portátil.
- m_{EI} : masa de la estructura inferior.
- m_{PB} : masa de la plancha para batería.
- m_{PK} : masa de la plancha para Kinect.
- m_{PC} : masa de la plancha para computadora portátil.
- $m_{platina}$: masa de la platina.
- m_I : masa inferior.
- m_T : masa total del robot.
- I_s : Corriente de los sensores.

3.5.1 DISEÑO DEL SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA

El diseño del sistema motriz y estructura tal como se explicó en el capítulo 3.4.1.2 se lo inicia por el motor, ya que siguiendo la metodología de diseño este es el elemento más importante y que definirá características de otros elementos tanto de este sistema como de los otros.

3.5.1.1 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico del sistema motriz tal como se muestra en el capítulo 3.4.1.2 consta solamente del motor.

3.5.1.1.1 Motor

La selección del motor se basa en las características necesarias mostradas en el capítulo 2.2.2.1, donde partimos de la potencia mínima y de la velocidad lineal que necesita el RAD4-23. Tomaremos en cuenta la velocidad lineal mínima la cual es de 0.6m/s y se propone un radio de llanta de 0.08m, con estos datos

obtenemos la velocidad angular, para luego con el valor de la potencia y velocidad angular podremos buscar y seleccionar el motor adecuado. Para calcular la velocidad angular se realiza este cálculo sencillo:

$$\omega = \frac{V}{r} \quad [3.1]$$
$$\omega = \frac{0.6m/s}{0.08m}$$
$$\omega = 7.5 \frac{rad}{s}$$

Transformamos este valor a revoluciones por minuto:

$$\omega = 7.5 \frac{rad}{s} \times \frac{1rev}{2\pi rad} \times \frac{60s}{1min}$$
$$\omega = 71,62 \text{ rpm}$$

El motor que se encontró que cumple con este valor de velocidad angular que es aproximadamente 72rpm y con una potencia de 224w necesaria es el motoreductor CM808075.

3.5.1.1.1.1 Motoreductor CM808075

Este motor se lo seleccionó debido a que cumple con las características mínimas necesarias y tiene un costo aceptable respecto a las especificaciones del mismo. Se lo seleccionó además debido a que su aplicación directa es para sillas de ruedas eléctricas y este proyecto se relaciona de cierta manera con las características de velocidad y fuerza de una silla de ruedas motorizada. Las especificaciones del motor se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Especificaciones motoreductor CM808075.

Parámetro	Capacidad
Alimentación	12 – 36 VDC
Velocidad (Sin carga)	120 RPM
Corriente (Sin carga)	1.6 A
Torque (A máxima eficiencia)	14 Nm
Potencia (A máxima eficiencia)	260 ω
Corriente (A máxima eficiencia)	14.7A
Eficiencia máxima	72%
Torque(A máxima carga)	55Nm
Corriente(A máxima carga)	54A
Diámetro del motor	88.9mm
Peso	7Kg
Relación caja reductora	17.75:1

FUENTE: Chiapua Components Limited,

http://www.cclmotors.com/Product_Catalogue/Shaded_Pole_Motor/pdf/GS33D-02.jpg, Inglés, 2011.

Como característica indispensable para la selección de la batería como fuente de alimentación del motor, es necesario conocer la corriente que se consumirá, para ello se utilizó la gráfica característica del motor que se muestra en la Figura 3.5.

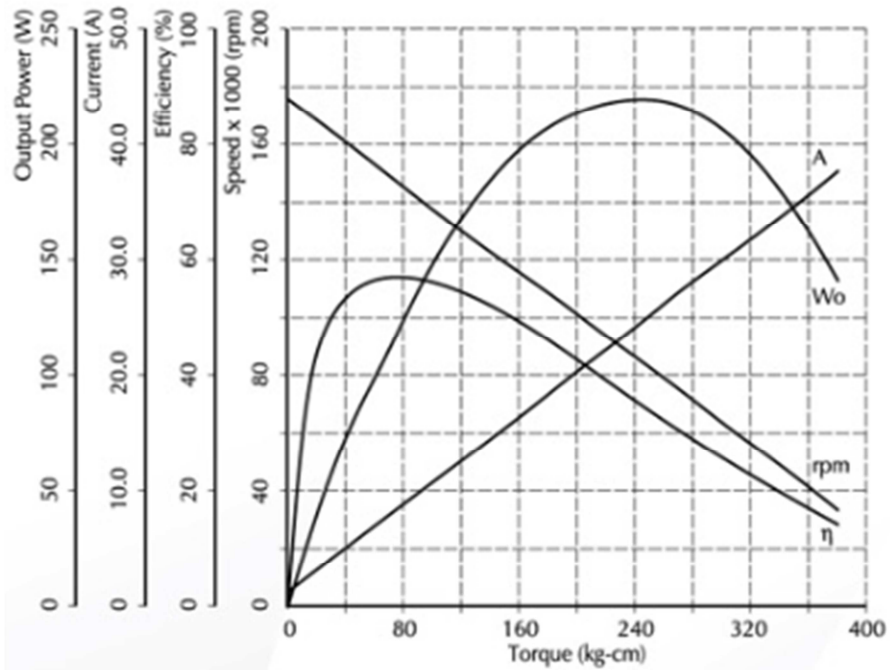


Figura 3.5 Curva característica del motor CM808075.

FUENTE: Chiapua Components Limited,

http://www.cclmotors.com/Product_Catalogue/Shaded_Pole_Motor/pdf/GS33D-02.jpg, Inglés, 2011.

Para poder adquirir los datos de esta gráfica es necesario tener el torque que produce la carga, para ellos utilizamos el dato de la fuerza calculada en el capítulo 2.2.2.1 y lo multiplicamos por el radio de la rueda.

Transformando a kg-cm tenemos:

Entrando a la curva característica del motor con este valor de torque obtendríamos un valor de aproximadamente 22.5A, sin embargo esta gráfica es solamente del motor sin tomar en cuenta la caja reductora, por lo cual dividimos este valor para la relación de la caja reductora, ya que la caja reductora aumenta el torque y disminuye la velocidad, influyendo directamente en la cantidad de corriente que consume, de manera que obtenemos una corriente de consumo de:

$$I_M = \frac{I}{i} \quad [3.3]$$
$$I_M = \frac{22.5A}{17.75}$$
$$I_M = 1.44A$$

Incluyendo el dato de eficiencia del 40% que también podemos obtener de esta gráfica utilizando el torque, tendríamos entonces una corriente de:

$$I_M = 1.44A \times 1.6$$
$$I_M = 2.3A$$

El torque puede llegar a subir por ciertos intervalos de tiempo, dependiendo de la carga a la que podría estar expuesto el RAD4-23 o por algún obstáculo pequeño.

Durante pruebas realizadas, en las cuales se intentó frenar el movimiento del motor, se pudo observar que este valor puede llegar a valores de 4A. Sin embargo, el valor aproximado al que el motor llegaría constantemente con carga sería de 3A. Como tenemos dos motores tendríamos una corriente de 6A.

Al realizar pruebas con el motor conectado a una fuente de 24V, se observó que la velocidad era mayor a la esperada, lo cual traería problemas al momento del movimiento del robot, ya que este se movería muy rápido respecto al movimiento del usuario. Por esta razón se optó por reducir su voltaje de alimentación a 12V, para cambiar las características del mismo. El rango de

alimentación de los motores es de 12V a 24V, por lo que se puede realizar este cambio sin complicaciones. Al realizar las pruebas nuevamente, se pudo comprobar que este tenía ahora una velocidad dentro de los valores esperados para el movimiento a una velocidad de 0.6 m/s . Por esta razón se opta por una alimentación de los motores de 12VDC.

3.5.1.2 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema motriz tal como se muestra en el capítulo 3.4.1.2 consta solamente del controlador de los motores.

3.5.1.2.1 Controlador de motores

Tal como se describe en el capítulo 3.5.1.1.1 el consumo de corriente es de aproximadamente 3A por cada motor y el voltaje de alimentación es de 12VDC. Las corrientes a las que trabajan estos motores hacen necesario el uso de un circuito de potencia. Es necesario para ello analizar las características que se necesitan por parte del circuito de potencia, donde se destacan las siguientes:

- Corriente y voltaje mínimos que cumplan los requerimientos del motor.
- Control de velocidad.
- Control de cambio de giro.
- Sensor de corriente por cada motor.
- Protección de sobre corriente.
- Protección de sobre voltaje.
- Protección para cortocircuitos.
- Protección de contracorriente.

La corriente y voltaje mínimos vendrán dados por los elementos de potencia a utilizar, sean estos transistores de potencia, MOSFETs o IGBTs. Depende del diseño del circuito.

Debido al control de cambio de giro que se requiere es necesario utilizar una configuración de puente H completo por cada motor. Existen diseños comerciales de controladores que resultan en un costo menor que un diseño propio y compra de elementos para la construcción del mismo. Entonces la búsqueda del controlador se reduce a un puente H con las características enunciadas con anterioridad.

Se encontró a través de investigación un puente H dual que además de cumplir con las características anteriores, tiene un diseño que se acopla con el Arduino Mega (El microcontrolador seleccionado) del cual se habla en el capítulo 3.5.2.1.3. Adicionalmente este puente H dual tiene sus propias librerías de programación para Arduino. En el siguiente capítulo se detalla la placa controladora Pololu VNH5019, el cual tiene dos puentes H completos, uno para cada motor del robot.

3.5.1.2.1.1 Placa controladora Pololu VNH5019 de motor dual para Arduino

Esta placa junto con las librerías para Arduino permite el fácil control bidireccional de motores DC con escobillas de alta potencia utilizando una placa Arduino. La placa controladora consta de un par de integrados VNH5019 para control de motor, los cuales operan en un rango entre 5.5 y 24V y puede entregar una corriente de 12A continuamente y picos de hasta 30A por cada canal. Contiene además los componentes del diagrama de aplicación típico de la hoja de datos del VNH5019, el cual se muestra en la Figura 3.6, incluyendo resistencias tanto de pull-up como de protección y FETS de protección de reversión de corriente para la batería.

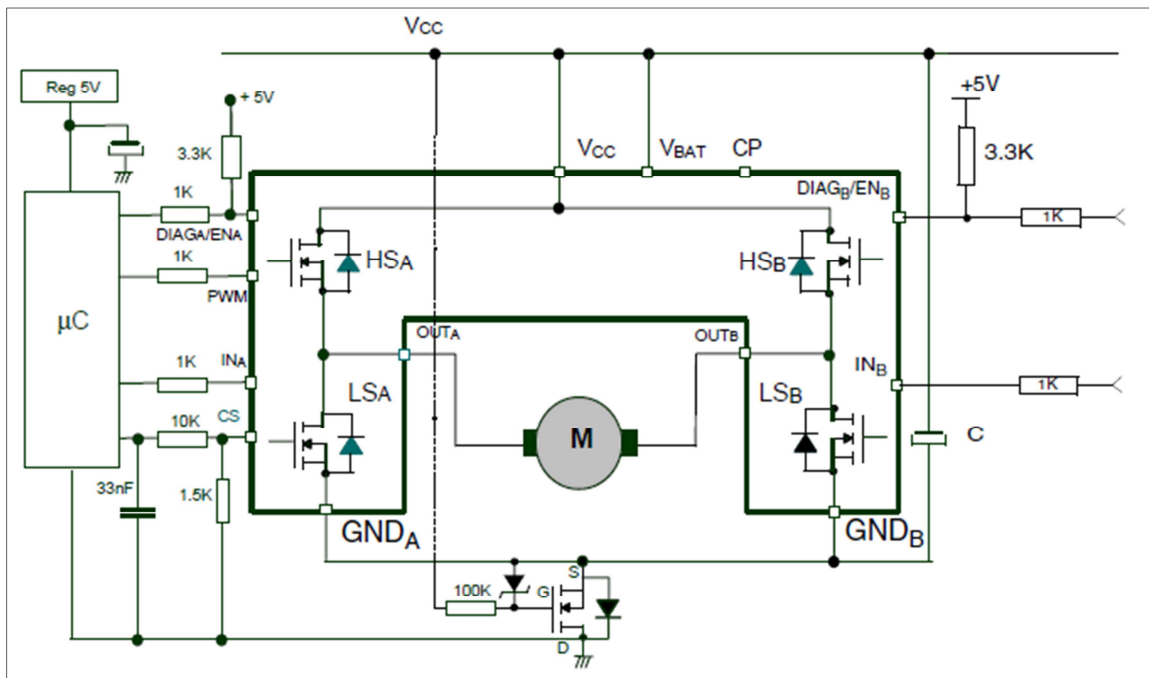


Figura 3.6 Diagrama de aplicación típico del driver VN5019.

FUENTE: ST, Hoja de datos VN5019, pp. 14.

En la Figura 3.7 se muestran imágenes de la placa controladora sin pines ni bornes, los cuales son entregados por el proveedor pero deben ser soldados por el cliente. En la Figura 3.8 se muestra el montaje sencillo sobre un Arduino UNO una vez soldados los pines y bornes.

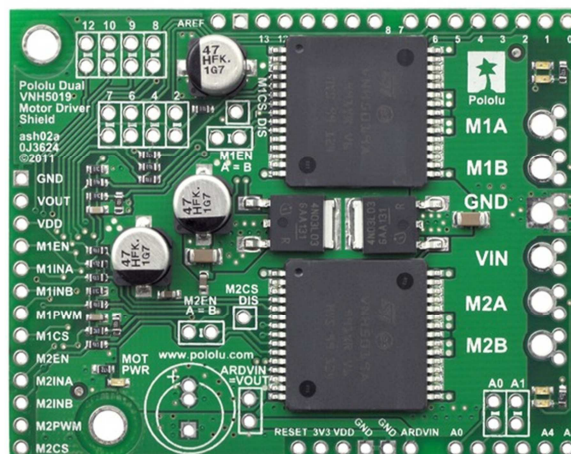


Figura 3.7 Placa driver Pololu VN5019 de motor dual para Arduino.

FUENTE: Pololu, productos. Recuperado de: <http://www.pololu.com/catalog/product/2502>, Inglés, 2013.



Figura 3.8 Placa driver Pololu VN1601 montada sobre un Arduino UNO.

FUENTE: Pololu, productos. Recuperado de: <http://www.pololu.com/catalog/product/2502>, Inglés, 2013.

A continuación se detallan las características completas de la placa controladora:

- Amplio rango de voltaje 5.5-24V.
- Alta corriente de salida: 12A continuamente y picos de 30A máximo por cada motor.
- Entradas compatibles con sistemas de 5V y 3.3V. (Umbral alto de 2.1V).
- Operación de PWM hasta 20KHz.
- Sensores de corriente con salida de voltaje proporcionales a la corriente del motor (Aproximadamente 140mv/A).
- LEDs indicadores para los motores que muestran que están haciendo las salidas aunque no haya motor conectado.
- Puede ser usado con Arduino o cualquier otro microcontrolador (Para el uso con otro microcontrolador es necesario usar los pines disponibles para ese caso).
- Cuando es usado como placa para Arduino, la fuente de alimentación del motor puede usarse como fuente de alimentación del Arduino.
- Puede resistir voltajes de entrada de hasta 41V.
- Apagado en caso de sobre voltaje y bajo voltaje.
- Protección de cortocircuitos.

En el Anexo B se muestra el diagrama esquemático de la placa controladora y de sus pines de conexión con una placa Arduino.

3.5.1.3 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema motriz y estructura consta de:

- Estructura principal.
- Cajas reductoras.
- Tipo de tracción.
- Sujeción de motores.
- Llantas delanteras.
- Ruedas locas traseras.

3.5.1.3.1 Estructura principal

El diseño de la estructura principal se divide en dos partes:

- Estructura de soporte.
- Planchas de soporte.

Antes de realizar ciertos diseños de espacios y formas de la estructura principal es necesario conocer que el dispositivo de visión artificial es el sensor Kinect, el cual se trata en el capítulo 4.

3.5.1.3.1.1 Estructura de soporte

Siendo este el elemento que define los tamaños y espacios para colocar todos los elementos del robot, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Comodidad para el usuario a la hora de colocar productos.
- Altura y espacio adecuado del soporte para el dispositivo de visión artificial.
- Espacio adecuado para colocar batería y motores.

Tomando en cuenta estos requisitos se realizó un diseño preliminar de la forma de la estructura de soporte.

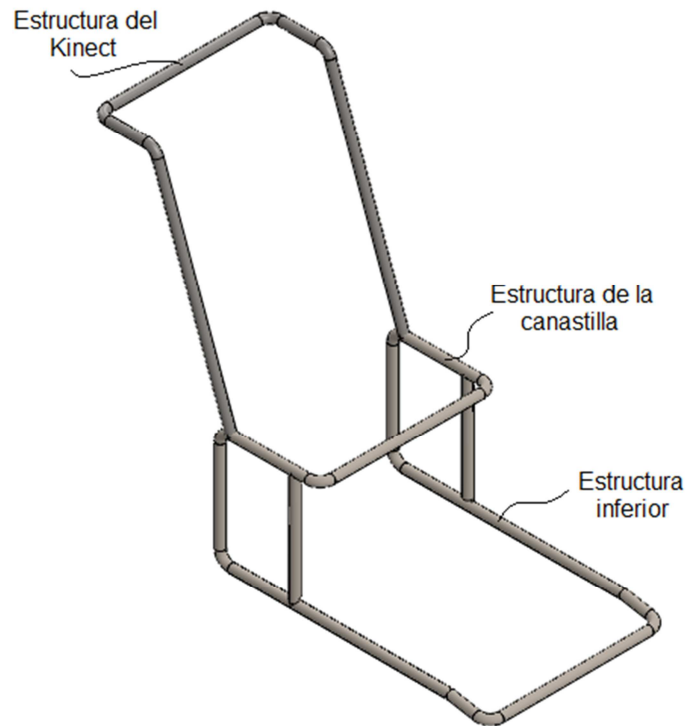


Figura 3.9 Forma de la estructura de soporte.

Fuente: Elaboración propia.

El diseño mostrado en la Figura 3.9 se basa en la forma de un carrito de compras común, con sus dimensiones adaptadas a las necesidades del usuario. Tenemos así, la estructura en donde va a ser asentada la canastilla con los diferentes productos y la estructura donde va a ir ubicado todo el sistema eléctrico y electrónico en conjunto con los motores. Se añade además la estructura superior donde el sensor Kinect (Dispositivo de visión artificial tratado en el capítulo 4) será ubicado de acuerdo a su propósito.

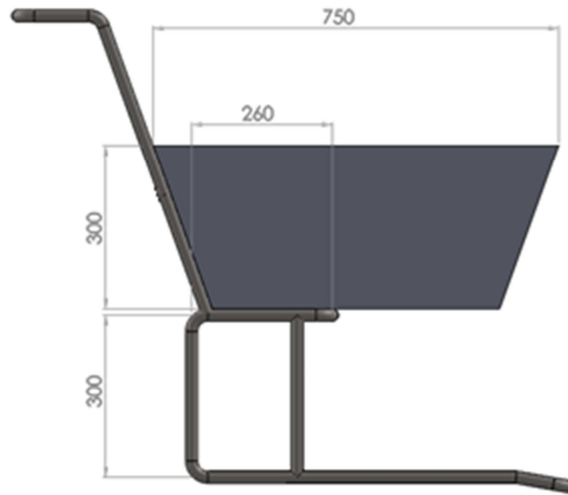
3.5.1.3.1.1.1 Dimensionamiento a partir de requisitos

Las dimensiones de la estructura principal deben estar basadas específicamente en los requisitos, de manera que se proporcione el espacio y altura adecuada dependiendo de los requerimientos del cliente y de los elementos que se van a utilizar. A continuación se detalla cada requisito.

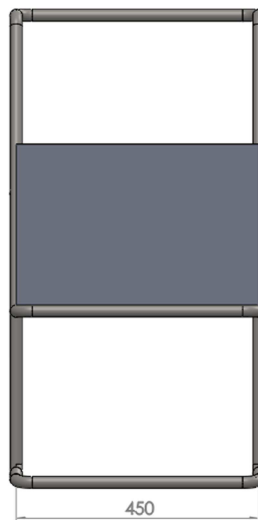
3.5.1.3.1.1.2 Comodidad para el usuario a la hora de colocar productos

El requerimiento principal para el usuario es la comodidad. Para cumplir con ello, se considera que es necesario que el usuario pueda depositar los productos en el fondo de la canastilla asentándolos, y no dejándolos caer. Estas medidas fueron analizadas en el capítulo 2.2.2.3 y a partir de ellas se dio las dimensiones que debería cumplir el RAD4-23.

En la Figura 3.10 se muestra estas dimensiones aplicadas a nuestro diseño, hay que recalcar que debido a que la canastilla no es parte de nuestro diseño, por cuestiones de dimensionamiento se consideró que esta tiene una altura de 300mm y un largo de 750mm para comodidad del usuario según el capítulo 2.1.2.3, que trata la antropometría del mismo. La estructura para la canastilla es de 260mm de largo y 450mm de ancho, sin embargo la dimensión de importancia para comodidad del usuario es la altura de 300mm a la que está el fondo de la canastilla, tomando en cuenta los alcances del usuario tratado en el capítulo 2.1.2.3.2.



(a)



(b)

Figura 3.10 Dimensiones de la estructura para la canastilla. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.3.1.1.3 Espacio adecuado para colocar batería y motores

Para este requisito se realizó la estructura inferior tomando en cuenta las medidas de los motores y de las baterías, sin desestabilizar el diseño completo antes realizado. El ancho de 450mm de la estructura se definió en el primer requisito, y de largo de 600mm fue elegido para que la estructura inferior quede

alineada con la posible canastilla de 750mm de largo, como se muestra en la Figura 3.11 Dimensiones de la estructura inferior. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

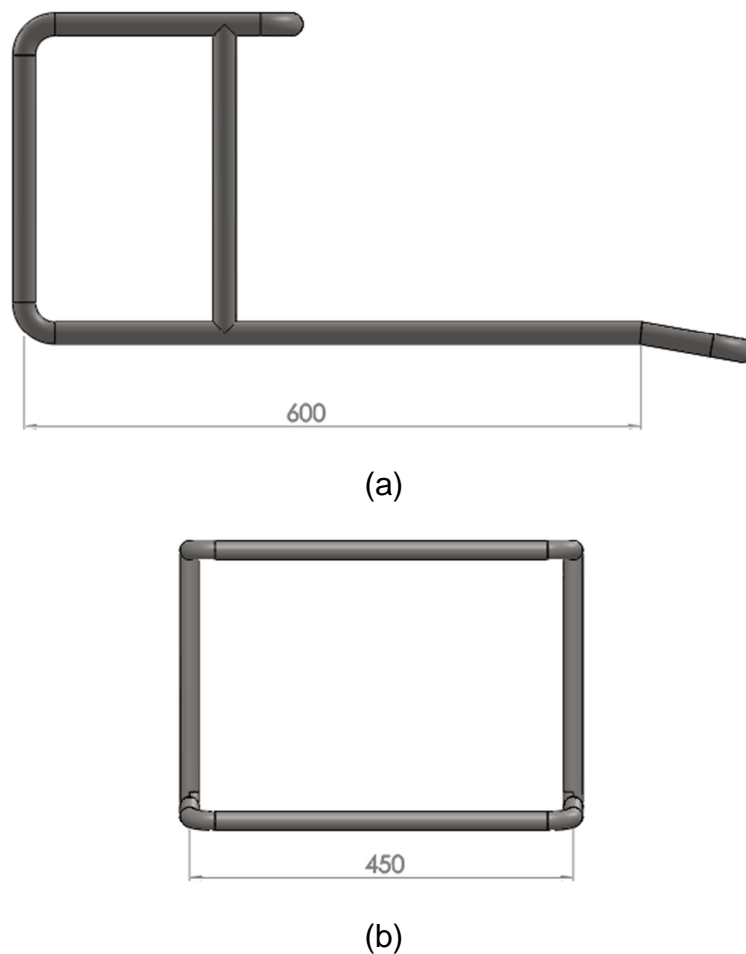


Figura 3.11 Dimensiones de la estructura inferior. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

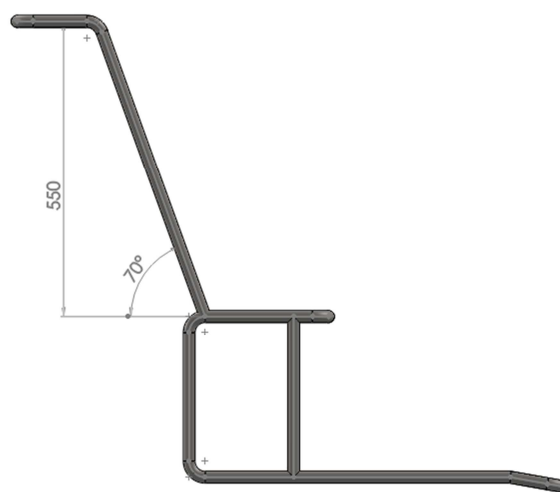
FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.1.1.4 Altura y espacio adecuados para el soporte del Kinect

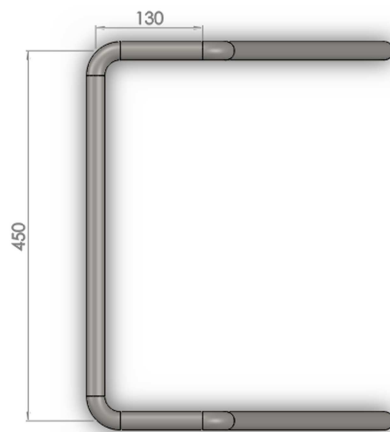
Se desea que el Kinect esté ubicado a una altura por debajo de la distancia de la cabeza del usuario respecto al suelo, esto para realizar el reconocimiento del mismo de lo cual se habla en el capítulo 4. Considerando la distancia de la cabeza respecto al suelo promedio indicada en el capítulo 2.1.2.3 la cuál es aproximadamente 1200mm, nos imponemos una altura de 900m para el Kinect.

Para cumplir con esta altura, la distancia entre la zona de la estructura donde se ubicará la canastilla y la zona donde descansará el Kinect debe ser de 550mm.

En cuanto al espacio necesario, se considera que para protección del dispositivo se colocará un colector alrededor del mismo, y tomando en cuenta las dimensiones del sensor Kinect el largo de esta parte de la estructura donde van a estar ubicados estos elementos es de 130mm y el ancho se elige de 450mm para poder unirla con facilidad a la parte inferior de la estructura. Finalmente se le da un ángulo de 70 grados respecto a la horizontal con fines estéticos. Todas estas dimensiones se muestran en la Figura 3.12.



(a)



(b)

Figura 3.12 Dimensiones de la estructura para el Kinect, (a) Vista lateral. (b) Vista superior.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.1.1.5 Simulación de deformación, esfuerzos y factor de seguridad de las partes de la estructura principal

Una vez dimensionadas las partes de la estructura principal, se someten a análisis de esfuerzos, deformación y factor de seguridad. Estos análisis se realizan con la ayuda del programa computacional *SolidWorks®*, utilizando la herramienta *SolidWorks Simulation*. Para realizar esta simulación es necesario definir el material, aplicar las cargas correctamente, definir las geometrías fijas y las uniones entre elementos si es que hay más de un elemento. El factor de seguridad elegido para esta sección del diseño es de 2.

3.5.1.3.1.1.5.1 Estructura inferior

La estructura inferior estará sometida a varias cargas, en el área para la batería está sometida al peso de la plancha, platinas, batería y otros elementos. No se considera el peso de los motores, debido a que la estructura inferior está asentada sobre los mismos. En el área que se ubicará la canastilla se considera una carga igual al peso de la canastilla y a un peso extra de los productos. En las esquinas superiores donde se sujeta la estructura que soporta el sensor Kinect, está sometida a una carga producida por el peso del sensor Kinect, la plancha de soporte, el cobertor y la estructura en sí. De igual manera, la estructura inferior estará sometida a momentos de fuerza producidos por estos pesos ubicados a cierta distancia del punto de sujeción.

Para el cálculo de la carga en el área para la canastilla tenemos la siguiente expresión:

$$m = m_c + m_p \quad [3.4]$$

Donde:

$$m_c = 5Kg$$

$$m_p = 20Kg$$

Lo que nos da un resultado de:

$$m = 25Kg$$

Para el cálculo de la carga en el área para la batería tenemos la siguiente expresión:

$$m = m_B + m_C + m_{PB} + (4 \times m_{platina}) \quad [3.5]$$

Donde:

$$m_B = 10.8Kg$$

$$m_b = 1.7Kg$$

$$m_{PB} = 2.5Kg$$

$$m_{platina} = 0.292Kg$$

Lo que nos da un resultado de:

$$m = 10.8 + 1.7 + 2.5 + (4 \times 0.292)$$

$$m = 16.17Kg$$

Para el cálculo de la carga en los puntos de sujeción de la estructura para el Kinect con la estructura inferior se toma en cuenta el peso de la estructura para el Kinect y la estructura para la computadora portátil con sus respectivos elementos, además se agrega el torque que estos provocan al estar a una distancia determinada de los puntos de sujeción.

El peso se obtiene de la siguiente expresión:

$$m = m_K + m_{EK} + m_{PK} + m_{cobertor} \quad [3.6]$$

Donde:

$$m_K = 0.2Kg$$

$$m_{EK} = 1.1Kg$$

$$m_{PK} = 0.6Kg$$

$$m_{cobertor} = 0.2Kg$$

Lo que nos da un resultado de:

$$m = 0.2 + 1.1 + 0.6 + 0.2$$

$$m = 2.1Kg$$

El torque producido por la estructura para el Kinect y sus elementos se obtiene de la siguiente expresión:

$$\tau = (m_K + m_{EK} + m_{PK} + m_{cobertor}) \times d \quad [3.7]$$

Donde d es la distancia aproximada del centro de masa de la estructura para el Kinect y sus elementos a los puntos de sujeción. Donde esta tiene un valor de 28.5cm. Reemplazando los datos en la expresión dada tenemos:

$$\tau = (0.2 + 1.1 + 0.6 + 0.2) \times 28.5$$

$$\tau = 59.85Kg.cm$$

Lo que se traduce a un torque de 5.87Nm.

Habiendo calculado todas las cargas a las que va a ser sometida la estructura se puede realizar la simulación del análisis de esfuerzos tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Geometrías fijas: puntos de sujeción en esquinas inferiores.
- Peso de la estructura para la canastilla y sus elementos: 25Kg.
- Peso de la estructura para las baterías y sus elementos: 16.17Kg.
- Peso de la estructura para el sensor Kinect y sus elementos: 2.1Kg.
- Torque de la estructura para el sensor Kinect: 5.87 Nm.

En la Figura 3.13 se muestran estas condiciones aplicadas a la estructura inferior en la simulación. Los resultados de análisis de esfuerzos se muestran en la Figura 3.14

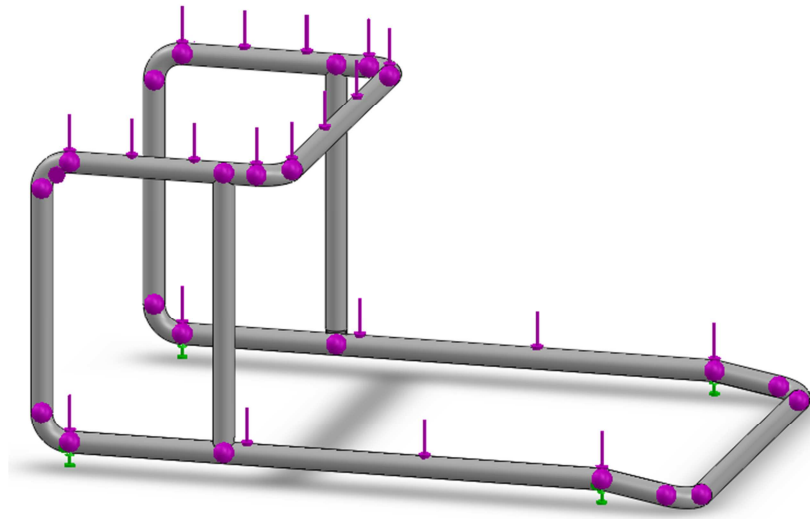


Figura 3.13 Geometrías fijas y cargas aplicadas a la estructura inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

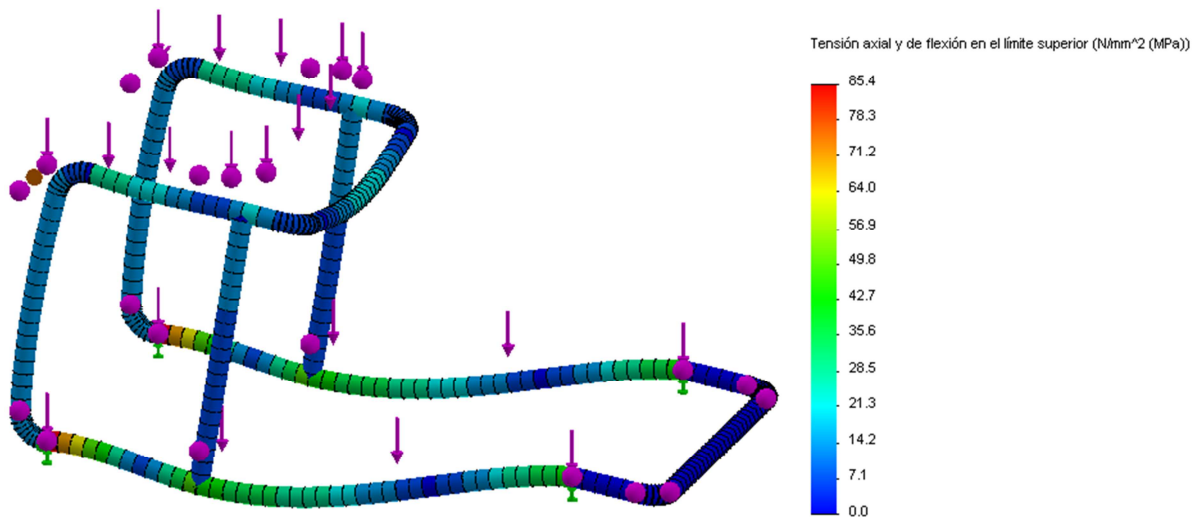


Figura 3.14 Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

Teniendo el resultado del análisis de esfuerzos de la estructura inferior se realiza el análisis de desplazamiento y de factor de seguridad con diferentes

materiales, según el peso total de la estructura y los resultados de los análisis se escoge la mejor opción para el material de la estructura inferior, como se muestra en la Tabla 3.4. Este análisis solo se realizará para la estructura inferior por ser esta estructura a la que más cargas serán sometidas.

Tabla 3.4 Tabla comparativa de materiales para la estructura inferior.

Material	Peso (Kg)	Desplazamiento máximo (mm)	Factor de seguridad	Costo (dólares/6m)
Hierro Fundido	2.68	1.02	6.43	7.45
Aluminio	1.50	1.78	1.86	22.26
Acero inoxidable	2.3	0.64	1.99	18.30

FUENTE: Elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en los análisis de desplazamientos y de factor de seguridad realizados, el material con mejores propiedades, peso y costo relativamente aceptable es el acero inoxidable. Por lo tanto se lo elige como el material a usar para la estructura inferior. Se decide utilizar un tubo de 7/8" de diámetro y 1.5mm de espesor.

Para los análisis de desplazamientos y de factor de seguridad se toma en cuenta lo siguiente entonces la aplicación del material de la estructura: Acero inoxidable AISI 439.

Los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 3.15 y los resultados del análisis de factor de seguridad de la estructura inferior se muestran en la Figura 3.16.

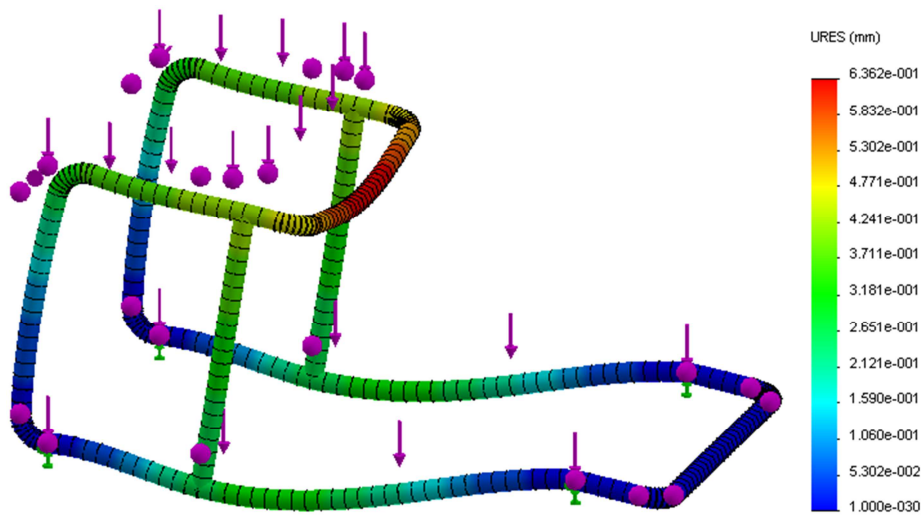


Figura 3.15 Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

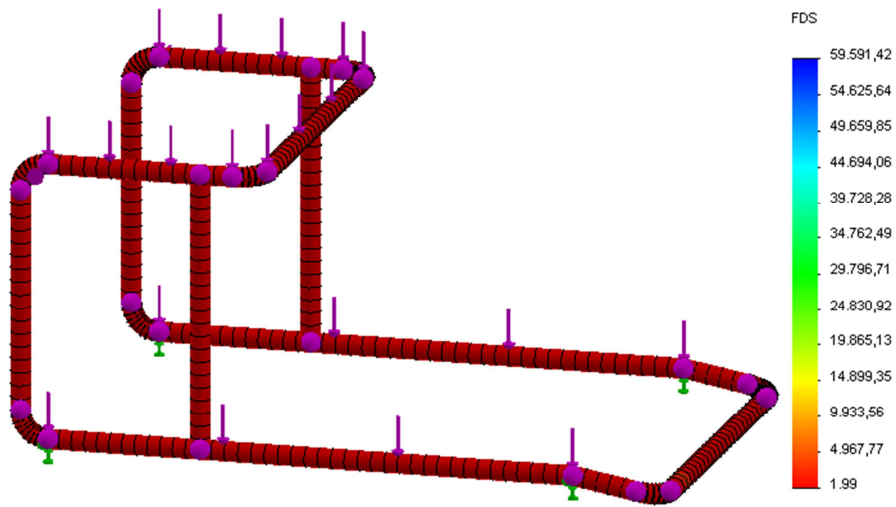


Figura 3.16 Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.1.1.5.2 Estructura para el Kinect

En la estructura para el Kinect, esta está sometida al peso del Kinect, de la plancha de soporte y del cobertor del Kinect. Para el cálculo de la carga en el área para el Kinect tenemos la siguiente expresión:

$$m = m_K + m_{PK} + m_{cobertor} \quad [3.8]$$

Remplazando los datos en la expresión se obtiene que:

$$m = 0.2 + 0.6 + 0.2$$

$$m = 1Kg$$

Para realizar la simulación se toman en cuenta entonces las siguientes consideraciones:

- Material: Acero inoxidable AISI 439.
- Geometrías fijas: puntos de sujeción inferiores.
- Peso de la plancha del Kinect y sus elementos: 1Kg.

En la Figura 3.17 se muestran estas condiciones aplicadas a la estructura para el Kinect en la simulación. Los resultados de análisis de esfuerzos se muestran en la Figura 3.18, los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 3.19 y finalmente el análisis de factor de seguridad se muestra en la Figura 3.20.

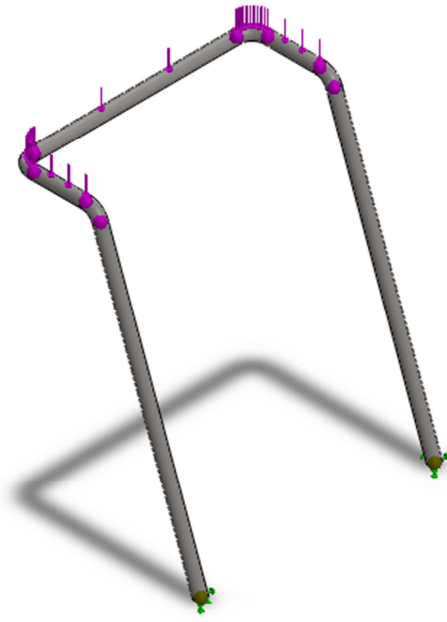


Figura 3.17 Geometrías fijas y cargas aplicadas a la estructura para el Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

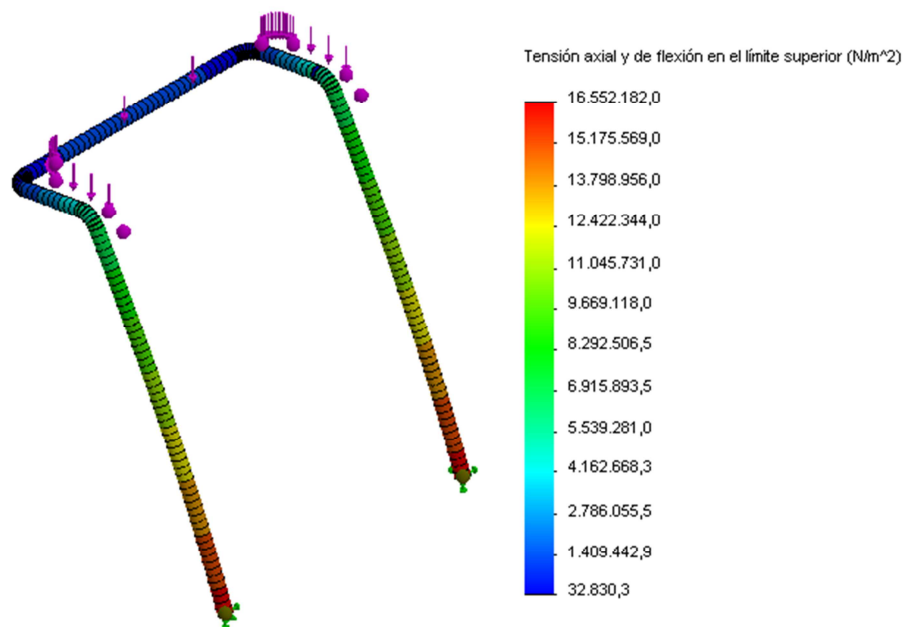
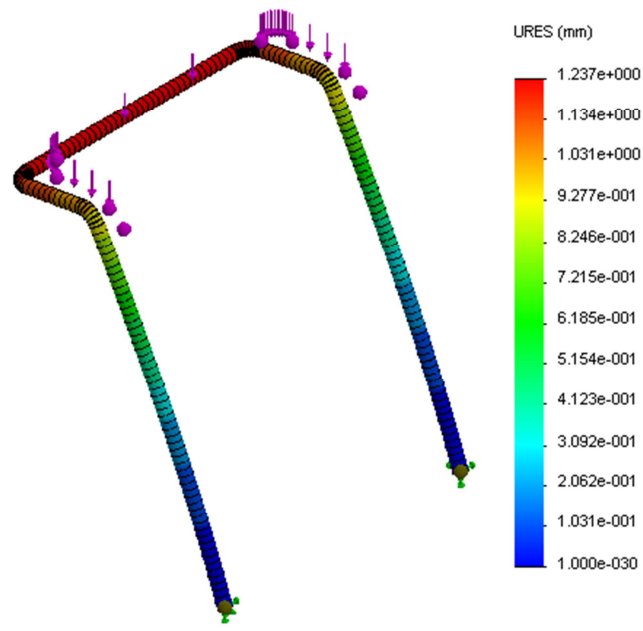
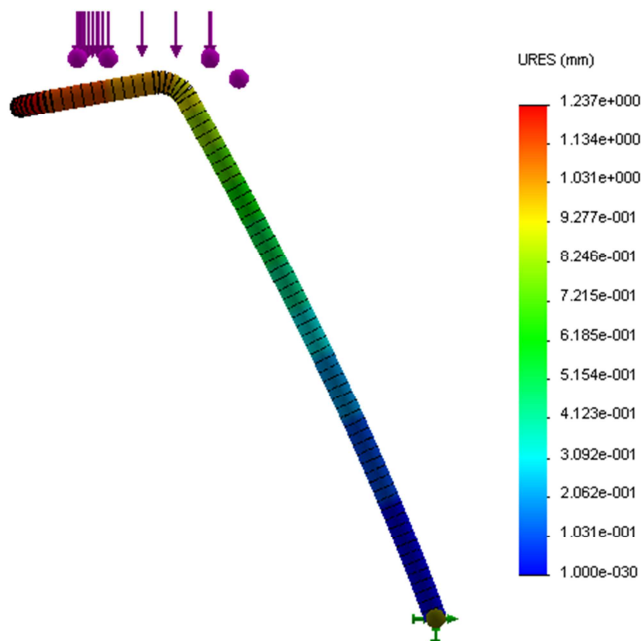


Figura 3.18 Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura para el Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.19 Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura para el Kinect. (a) Vista isométrica, (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

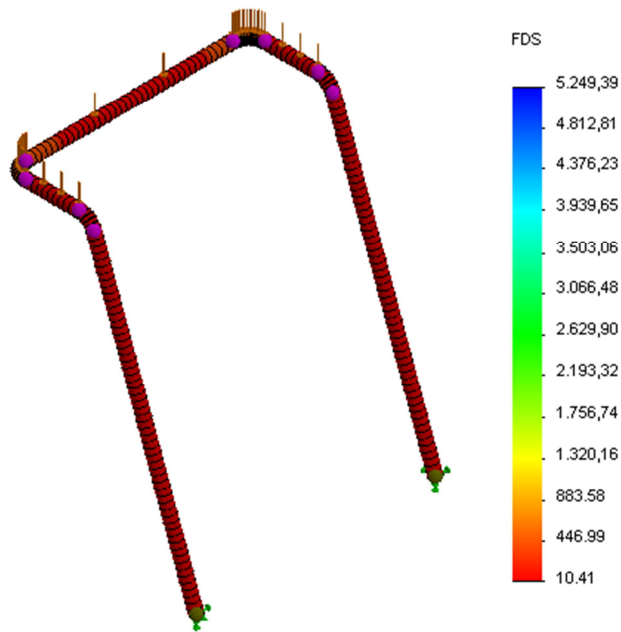


Figura 3.20 Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura para el Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.1.2 Planchas de soporte

En este capítulo se diseña las planchas donde están ubicados diferentes elementos. Las cuales las dividimos en:

- Plancha de soporte para batería.
- Plancha de soporte para Kinect.

3.5.1.3.1.2.1 Plancha de soporte para batería

Este soporte está conformado por una plancha y un número de platinas soldadas bajo ella, que tienen como trabajo sostener el peso de las batería, las cuales deben tener la resistencia suficiente para que no sobrepase un límite de deformación. Este límite consideramos debe ser menor a 1mm, esto para evitar

problemas de posibles vibraciones por obstáculos pequeños que pueden haber en el camino, y que provoquen movimiento de los elementos que están sobre ella. El factor de seguridad mínimo elegido para esta sección y para los soportes del Kinect es de 2.

Las platinas son necesarias debido a la superficie que está bajo carga y a los puntos de los cuales se va a sujetar la plancha. Si no se usaran platinas, la plancha sufriría una deformación mucho mayor de lo que se desea al estar sujeta solo de los extremos. Se podría utilizar una plancha de un espesor elevado y se lograría una mínima deformación, sin embargo esto aumentaría el peso total del robot.

El tamaño de la plancha es de 450mm x 530mm para ocupar todo el espacio inferior de la estructura principal. Además se considera un corte para proporcionar un espacio para ubicar el motor, el cual es de 190mm de largo y 20mm de ancho. Se elige un número de 4 platinas distribuidas como se muestra en la Figura 3.21, tomando en cuenta el elemento más pesado, en este caso la batería. El ancho de cada platina es de 30mm. El espesor de la plancha se asume de 1.4mm para análisis y simulaciones iniciales.

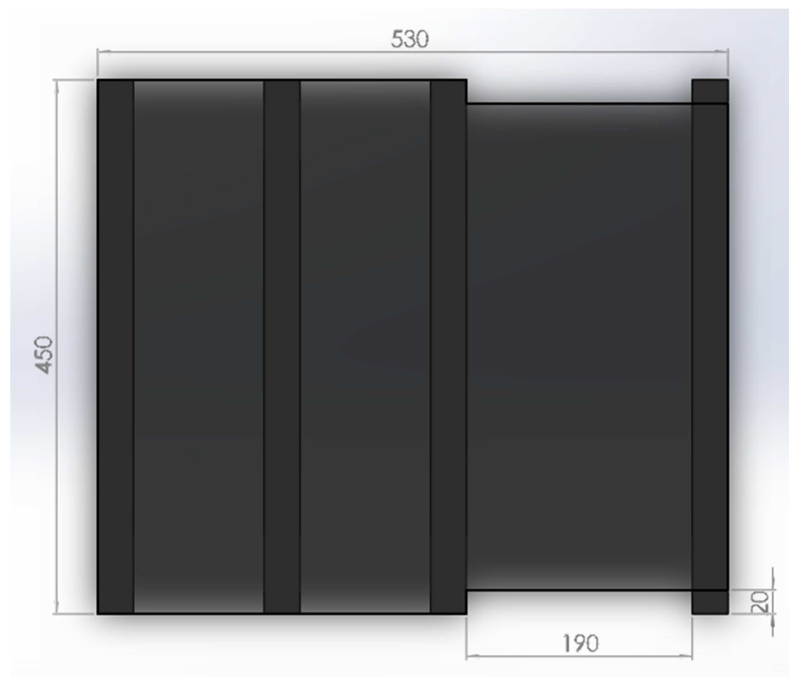


Figura 3.21 Forma y dimensión de la plancha de soporte para baterías y distribución de platinas.

Fuente: elaboración propia.

La batería estará ubicada en el espacio entre las dos platinas intermedias. Además se considera que se quiere que la concentración del centro de masa de todo el robot, esté en la parte delantera del mismo. Esto para evitar que el robot se levante si una persona aplica una carga en la parte superior de la estructura principal. En la Figura 3.22 se muestra la ubicación de la batería.

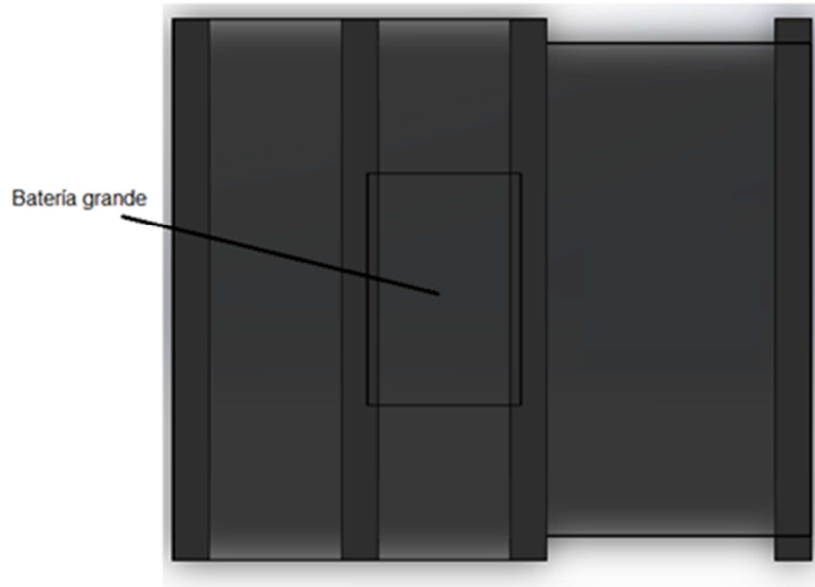


Figura 3.22 Ubicación de las baterías en su plancha de soporte.

Fuente: Elaboración propia.

El espesor de las platinas se diseñará considerando una viga sujeta a los extremos. Debido a la dificultad que supondría encontrar una expresión de la distribución de carga sobre la platina, se considera una carga puntual en el centro de la misma. Se realiza un análisis de la deformación máxima utilizando la expresión mostrada en la Figura 3.23.

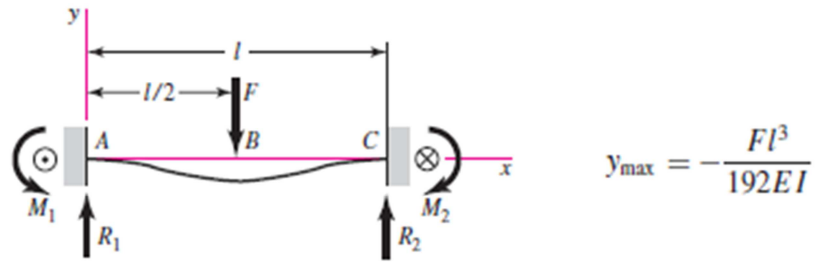


Figura 3.23 Cálculo de la deflexión máxima en una viga con sujeciones fijas en los extremos y carga puntual en el centro.

Fuente: Shigley J.E. Diseño en Ingeniería Mecánica. 8va edición. McGraw-Hill.2006. Inglés. Tabla A-9. pp 999.

La expresión de la deformación máxima es entonces:

Las platinas en las que se realizará el análisis serán las que estén sometidas a mayor distribución de peso, en este caso las platinas número 2 y 3 viendo la Figura 3.21 de izquierda a derecha. El análisis se lo hará sobre una sola platina considerando que la carga sobre las dos es aproximadamente la misma. La carga a considerar según la distribución de la batería y los elementos electrónicos a utilizar es entonces: la mitad del peso de la batería, más el peso del computador y su estructura de soporte, más la masa de la plancha dividido para 4 y más su propio peso de manera que obtenemos la siguiente expresión:

— — —

Reemplazando los respectivos valores tenemos:

— — —

$$m_I = 6.87Kg + m_{platina} \quad [3.11]$$

La masa de la platina depende del espesor de la misma por lo cual será necesario calcularla para cada caso. El material que se utiliza es hierro gris, debido a su costo reducido y resistencia mecánica. Iniciamos el análisis con un espesor de 2mm y a partir de este aumentaremos o disminuirémos el espesor.

3.5.1.3.1.2.1.1 Análisis para platinas de espesor 2mm

Los datos que tenemos sobre el material y las dimensiones de la platina son:

$$L = 0.45m$$

$$a = 0.03m$$

$$E = 66GPa$$

$$\rho = 7200 \frac{Kg}{m^3}$$

Los datos que nos hace falta para calcular la deformación máxima son la fuerza y la inercia. Para encontrar la masa total nos hace falta la masa de la platina la cual encontramos multiplicando su volumen por la densidad del hierro gris:

$$m_{platina} = e \times a \times L \times \rho \quad [3.12]$$

Para un espesor de 2mm tenemos:

$$m_{platina} = 0.002m \times 0.03m \times 0.45m \times 7200 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{platina} = 0.1944Kg$$

Remplazando en la expresión 3.11 la masa inferior total sería entonces:

$$m_I = 6.87Kg + 0.1944Kg$$

$$m_I = 7.06Kg$$

La fuerza es por lo tanto:

$$F = 7.06Kg \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 69.26N$$

El momento de inercia para un área rectangular es:

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad [3.13]$$

Donde la base es paralela al eje de flexión y h es perpendicular al mismo. Para nuestro caso la flexión se da respecto al eje z según los ejes de coordenadas de la Figura 3.23. De manera que la base sería el ancho de la platina y la altura el espesor de la misma, de manera que tenemos:

$$I = \frac{a \times e^3}{12} \quad [3.14]$$

Para un espesor de 2mm tenemos:

$$I = 0.03 \times 0.002^3 m^3$$

$$I = 0.24 \times 10^{-9} m^4$$

Remplazando todos los datos en la expresión 3.9 la deformación es:

$$y_{max} = \frac{-F \times L^3}{192 \times E \times I}$$

$$y_{max} = \frac{69.26N \times 0.45^3 m^3}{192 \times 66 \times 10^9 \frac{N}{m^2} \times .24 \times 10^{-9} m^4}$$

$$y_{max} = -2.08mm$$

La deformación máxima es mayor a lo deseado por lo que se aumenta el espesor de la platina a 2.5mm.

3.5.1.3.1.2.1.2 Análisis para platinas de espesor 2.5mm

Los cambios que hay respecto al análisis anterior son el valor de la fuerza y de la inercia. Reemplazando en la expresión 3.12 la masa para un espesor de 2.5mm es:

$$m_{platina} = 0.0025m \times 0.03m \times 0.45m \times 7200 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{platina} = 0.243Kg$$

La masa total es ahora:

$$m_I = 6.87Kg + 0.243Kg$$

$$m_I = 7.11Kg$$

La fuerza por lo tanto es:

$$F = 7.11Kg \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 69.75N$$

Reemplazando el espesor de 2.5mm en la expresión 3.14, la inercia es:

$$I = 0.03 \times 0.0025^3 m^3$$

$$I = 0.46 \times 10^{-9} m^4$$

Remplazando todos los datos en la expresión 3.9 la deformación es:

$$y_{max} = \frac{-F \times L^3}{192 \times E \times I}$$

$$y_{max} = \frac{69.75 N \times 0.45^3 m^3}{192 \times 66 \times 10^9 \frac{N}{m^2} \times 0.47 \times 10^{-9} m^4}$$

$$y_{max} = -1.09 mm$$

Este es un valor de deformación aceptable, sin embargo debido a las aproximaciones realizadas de distribución de carga, y teniendo en cuenta que hacemos un diseño considerando el peor caso, entonces queremos mantener este valor por debajo de 1mm. Por lo tanto aumentaremos por última vez el espesor de la platina a 3mm.

3.5.1.3.1.2.1.3 Análisis para platinas de espesor 3mm

Como ya se vio anteriormente se calculará la fuerza e inercia, tenemos entonces:

$$m_{platina} = 0.003m \times 0.03m \times 0.45m \times 7200 \frac{Kg}{m^3}$$

$$m_{platina} = 0.292Kg$$

La masa total es ahora:

$$m_I = 6.87Kg + 0.292Kg$$

$$m_I = 7.16Kg$$

La fuerza por lo tanto es:

$$F = 7.16Kg \times 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 70.24N$$

Remplazando el espesor de 3mm en la expresión 3.14, la inercia es:

$$I = 0.03 \times 0.003^3 m^3$$

$$I = 0.81 \times 10^{-9} m^4$$

Remplazando todos los datos en la expresión 3.9 la deformación es:

$$y_{max} = \frac{-F \times L^3}{192 \times E \times I}$$

$$y_{max} = \frac{70.24N \times 0.45^3 m^3}{192 \times 66 \times 10^9 \frac{N}{m^2} \times 0.81 \times 10^{-9} m^4}$$

$$y_{max} = -0.624mm$$

Debido a que la deformación máxima es menor a 1mm que es lo que se busca, el espesor adecuado para la platina es de 3mm.

3.5.1.3.1.2.1.4 Simulación de deformación, esfuerzos y factor de seguridad del ensamble platinas-plancha

La carga aplicada sobre la plancha de soporte es principalmente el peso de la batería, se hicieron simulaciones colocando los pesos del computador y de la placa electrónica, sin embargo el cambio es mínimo, por lo cual se considera la carga concentrada solamente en el área de la batería. Una carga adicional sobre esta plancha es la reacción que hay en las ruedas locas debido al peso total, de las cuales se decide su ubicación en el capítulo 3.5.1.3.6.

Para calcular el valor de esta reacción se encuentra el peso total del RAD4-23 y se lo divide para 4, debido a que tenemos 4 ruedas en total, y lo multiplicamos por la gravedad. De manera que tenemos:

$$m_T = m_I + m_{estructura} + 2 \times m_{motor} + m_K + m_{EK} + m_{PK} + m_{cobertor} + m_C + m_{EC}$$

$$m_T = 37.56Kg$$

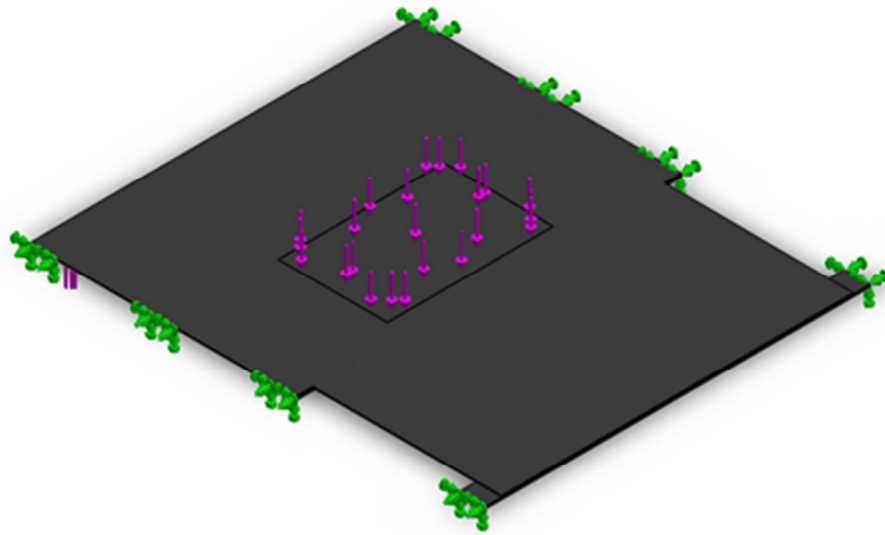
$$R_r = \frac{37.56Kg}{4} \times 9.81 \frac{m}{s}$$

$$R_r = 92.12N$$

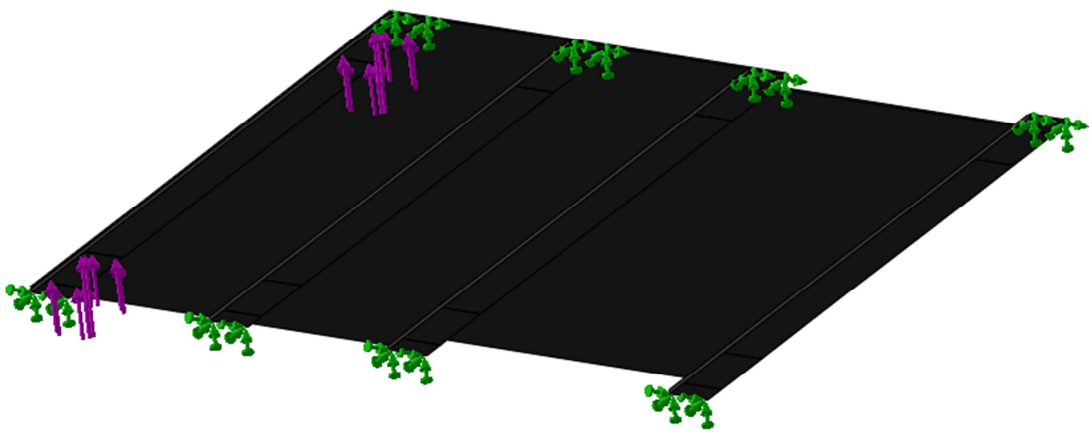
Las consideraciones serán entonces:

- Material: Hierro gris.
- Geometrías fijas: extremos de las platinas.
- Peso de la batería: 10.8Kg.
- Reacciones en la zona de las ruedas locas: 92.12N.
- Unión rígida entre cada platina y la plancha.

Aplicando estas consideraciones tenemos lo mostrado en la Figura 3.24. Los resultados de análisis de esfuerzos se muestran en la Figura 3.25 y los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 3.26.



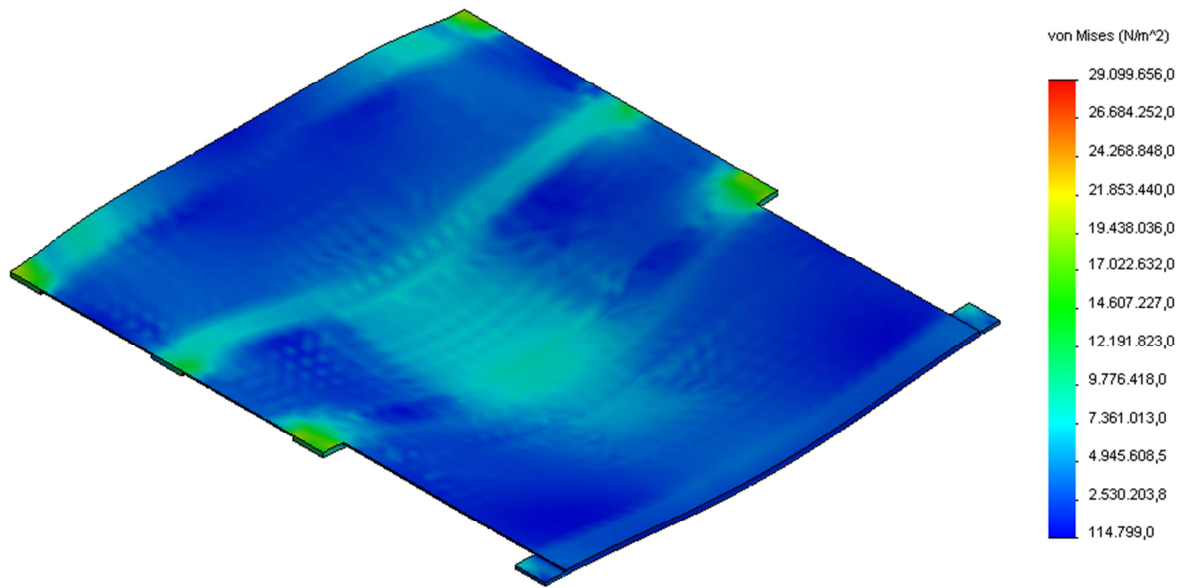
(a)



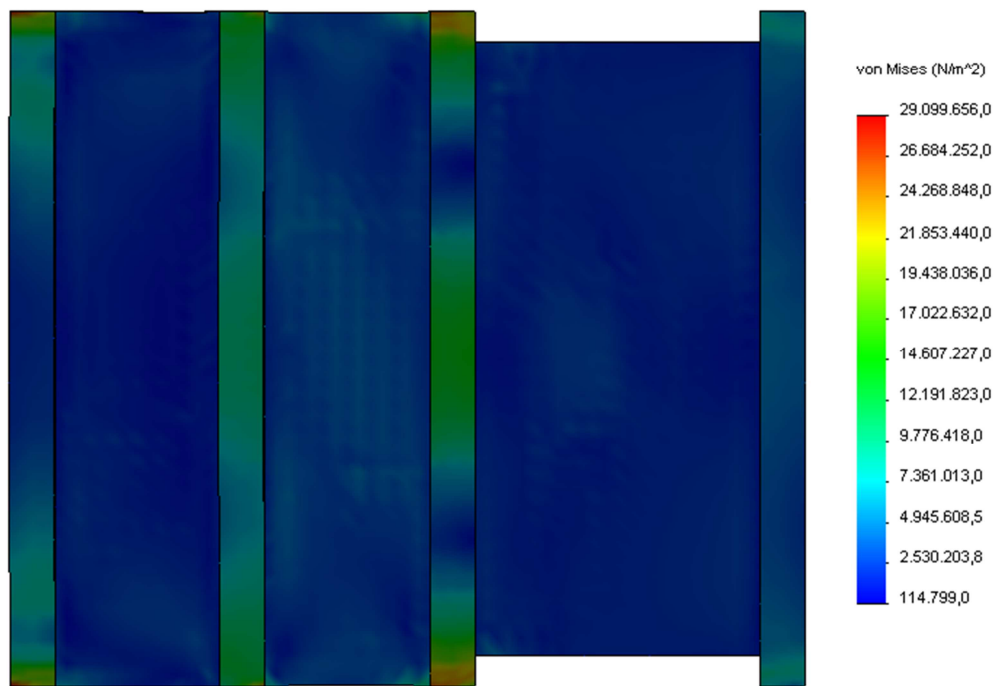
(b)

Figura 3.24 Geometrías fijas y fuerzas aplicadas al ensamble platinas-plancha. (a) Vista isométrica, (b) Vista desde un ángulo que muestre la parte inferior.

Fuente: Elaboración propia.



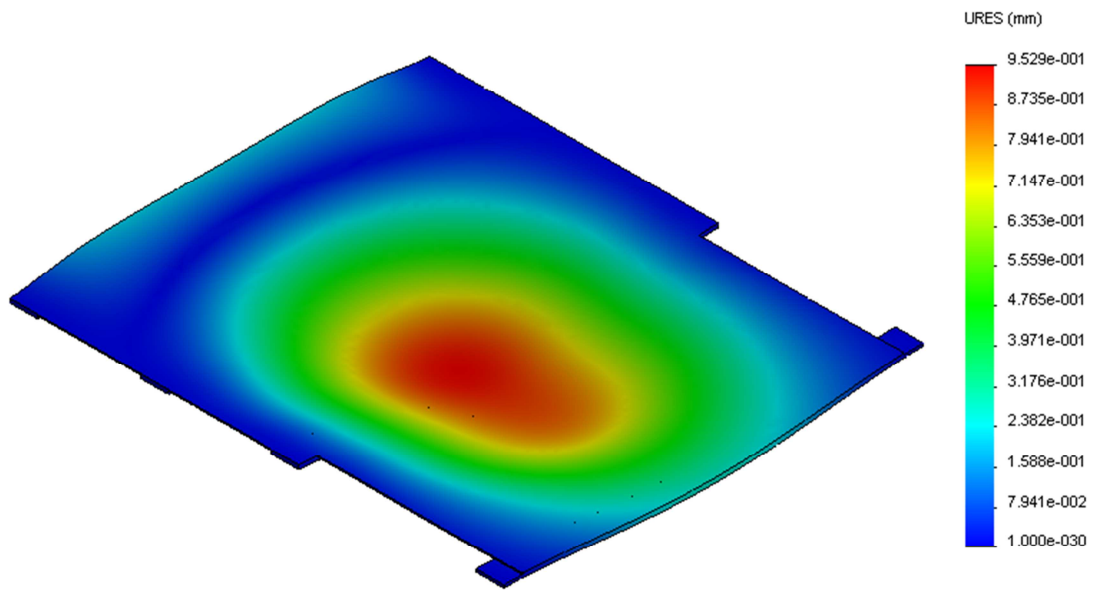
(a)



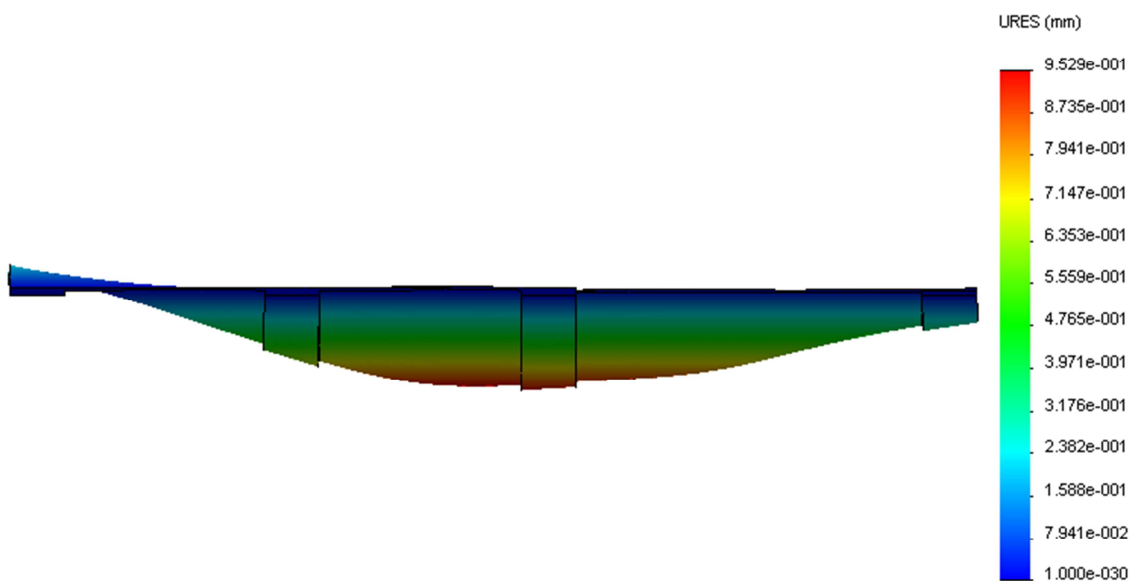
(b)

Figura 3.25 Resultados del análisis de esfuerzos en el ensamble platinas-plancha. (a) Vista isométrica. (b) Vista inferior.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

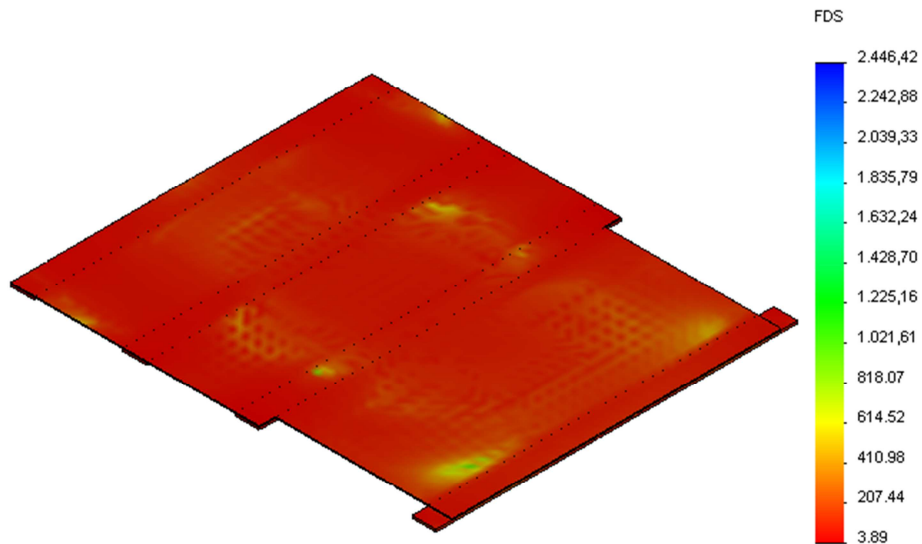
Figura 3.26 Resultados del análisis de desplazamientos en el ensamble platinas-plancha. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral.

Fuente: elaboración propia.

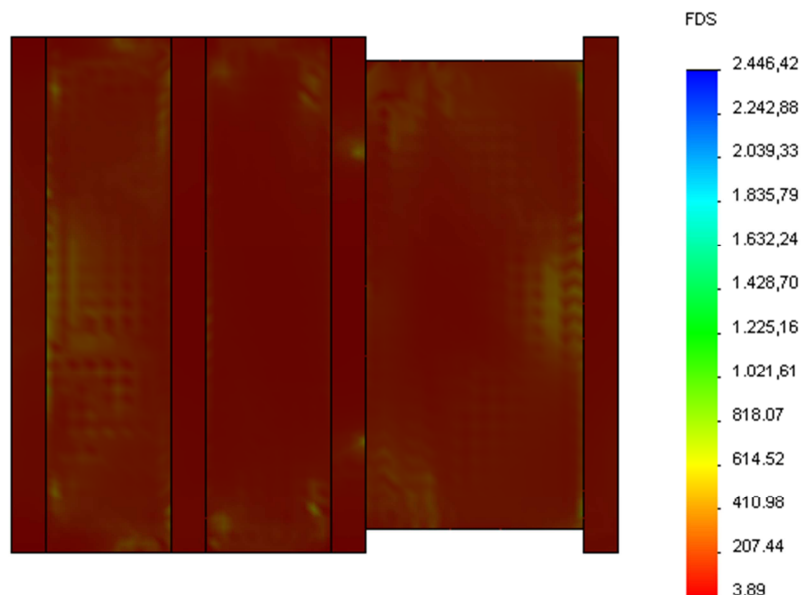
Como se puede ver en la Figura 3.26 la deformación máxima es de 0.95mm. En los cálculos manuales obtuvimos un valor de 0.62mm, la diferencia

se debe a las aproximaciones que se realizó de cargas puntuales y distribución de cargas.

Adicionalmente esta herramienta computacional nos permite realizar un trazado de factor de seguridad, este se muestra en la Figura 3.27.



(a)



(b)

Figura 3.27 Resultados del trazado de factor de seguridad en el ensamble platinas-plancha. (a) Vista isométrica. (b) Vista inferior.

Fuente: elaboración propia.

3.5.1.3.1.2.1.5 Interpretación de análisis realizados y resultados obtenidos

La deformación máxima tiene un valor de 0.92mm lo cual cumple con la condición impuesta de ser menor a 1mm, además nuestro factor de seguridad para el diseño impuesto es de 2, de la simulación se obtuvo que el valor mínimo es de 3.9. De manera que el diseño cumple con los requerimientos establecidos utilizando para esto una plancha de 1.4mm de espesor.

3.5.1.3.1.2.2 Plancha de soporte para Kinect

La plancha que soporta el Kinect tiene como única condición que ocupe el área que le compete. Esta ya fue definida en el dimensionamiento de la estructura de soporte, por lo que sus dimensiones son de 130mm x 450mm. Además se le realiza un agujero en la parte trasera para pasar el cable de conexión del Kinect y 4 agujeros para colocar pernos de su respectivo protector. Este diseño se muestra en la Figura 3.28, donde el área central es donde está colocado el Kinect y las áreas en forma de “L” son los asientos del protector del cual se habla en el capítulo 3.5.2.2.2. En la Figura 3.29 se muestra una vista isométrica de la ubicación de las 2 partes sobre la plancha.

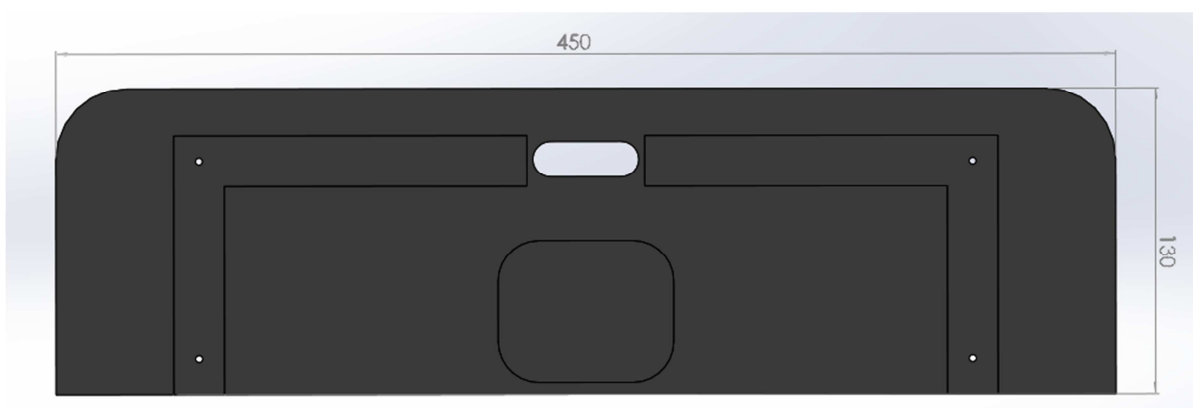


Figura 3.28 Forma de la plancha de soporte para Kinect.

Fuente: Elaboración propia.

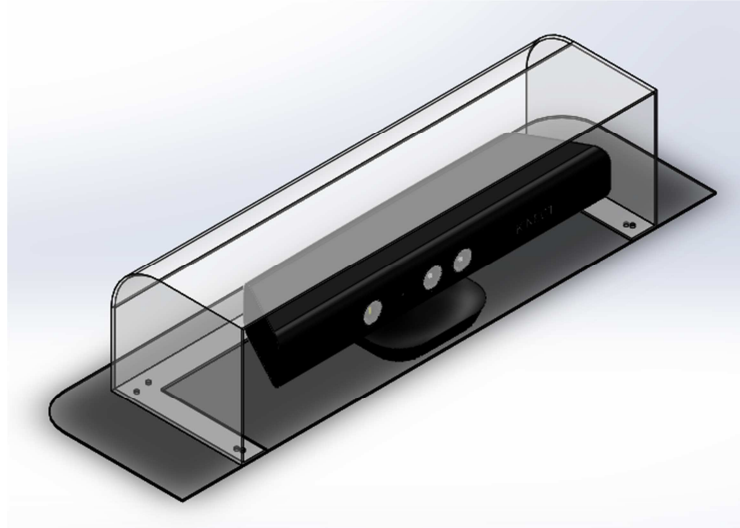


Figura 3.29 Ubicación de elementos en la plancha de soporte para Kinect.

Elaboración propia.

La carga aplicada sobre esta plancha es mínima sin embargo se busca que en esta plancha exista la mínima deformación. Esto debido a que el Kinect al ser un elemento delicado debe estar sujeto al menor número de vibraciones. Por esta razón la deformación de esta plancha deberá ser menor a la de las baterías. Se propone como máxima deformación para esta plancha un valor de 0.5mm. Se realiza entonces solamente una simulación de deformaciones.

3.5.1.3.1.2.2.1 Simulación de deformación de la plancha de soporte para Kinect

Puesto a que esta plancha estará soldada a la estructura principal, estos extremos se consideran geometrías fijas. Para realizar esta simulación tenemos entonces las siguientes consideraciones:

- Material: Hierro gris.
- Geometrías fijas: extremos soldados a la estructura principal.
- Peso del Kinect: 200g.
- Peso del cobertor y tornillos: 200g.

En la Figura 3.30 se muestran estas condiciones aplicadas en la simulación. Los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 3.31.

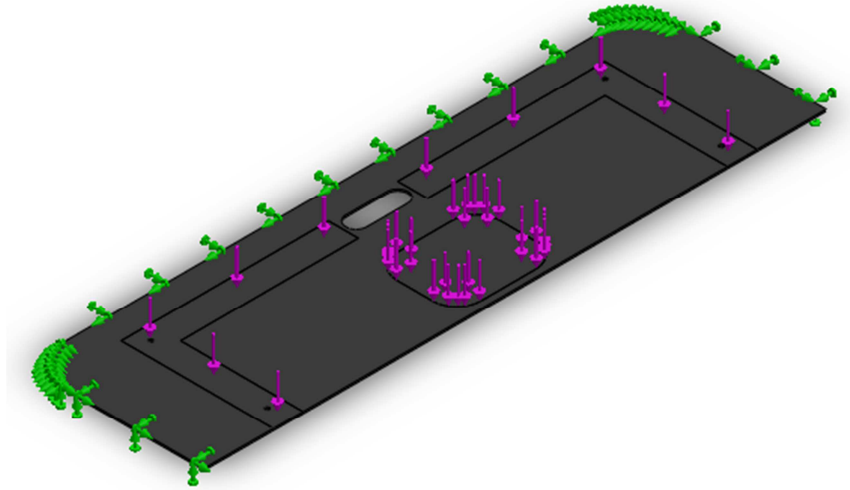
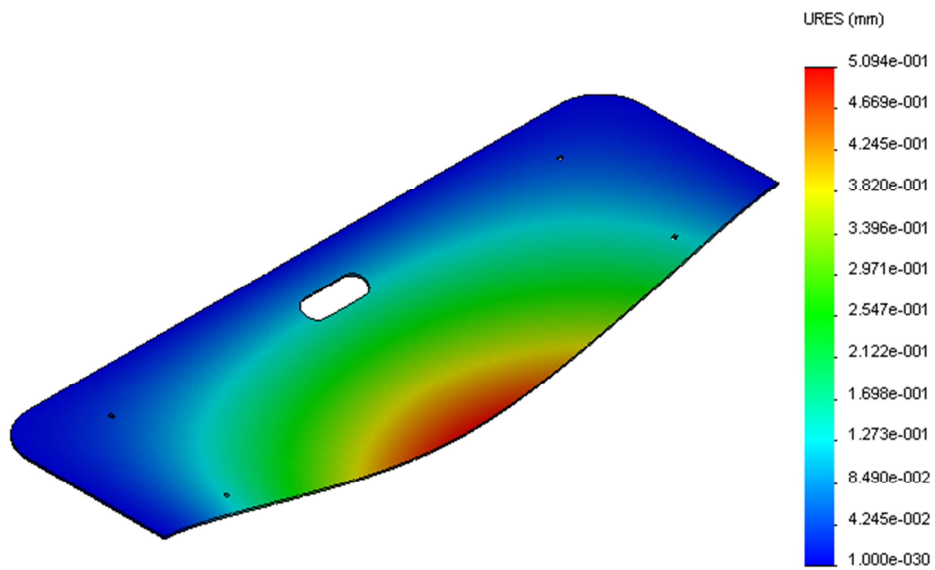
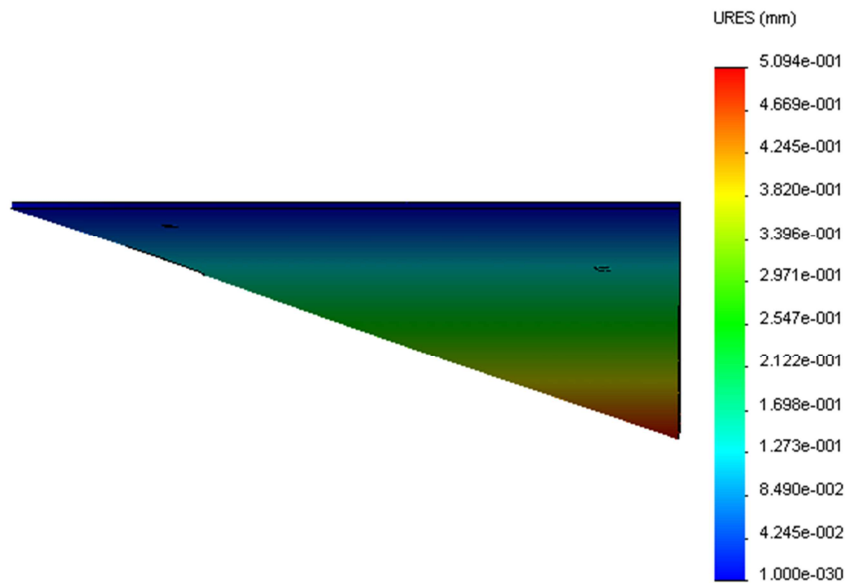


Figura 3.30 Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en la plancha de soporte para Kinect.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.31 Resultados del análisis de desplazamientos en la plancha de soporte para Kinect. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.3.2 Cajas reductoras

Tal como se vio en el capítulo 3.5.1.1.1.1 la caja reductora está acoplada directamente al motor formando un motoreductor que entrega las características de velocidad y torque que se ajustan a las especificaciones del RAD4-23. Al comprar un motor con estas características además se ahorran costo de construcción y diseño de una caja reductora. Solamente se indica entonces que la relación de transformación de la caja reductora del motoreductor CM808075 es de 17.75:1 y que la salida de la misma tiene la misma dirección que la entrada.

3.5.1.3.3 Tipo de tracción

Tal como se indicó en el capítulo 2.2.2, la tracción del RAD4-23 será utilizando dos motores en la parte delantera para lograr los giros y dos ruedas locas en la parte trasera. El motor está conectado directamente al motoreductor y

el eje de este a su vez está directamente conectado a la llanta. De manera que tendremos una distribución como se muestra en la Figura 3.32.

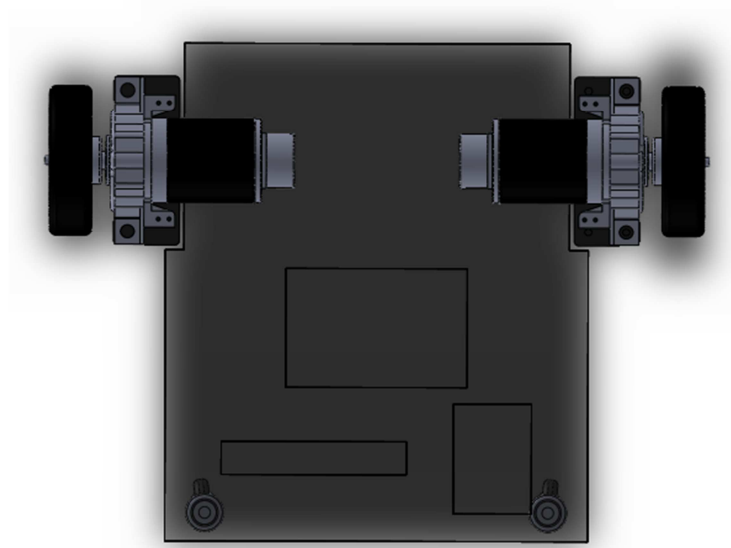


Figura 3.32 Distribución del sistema de tracción.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.4 Sujeción de motores

Se diseña un acople para los motores que tiene como función fijar el motor a la estructura principal, este acople tiene una forma tal que se une por medio de un cordón de soldadura a la estructura principal. El motor se fija al acople por medio de pernos y tuercas de seguridad por lo que el acople debe tener agujeros por los que entrarán los pernos. Este diseño se muestra en la Figura 3.33, donde el área superior es donde se sujeta el acople a la estructura principal. En la Figura 3.34 se muestra una vista explosionada de la ubicación de los elementos montados.

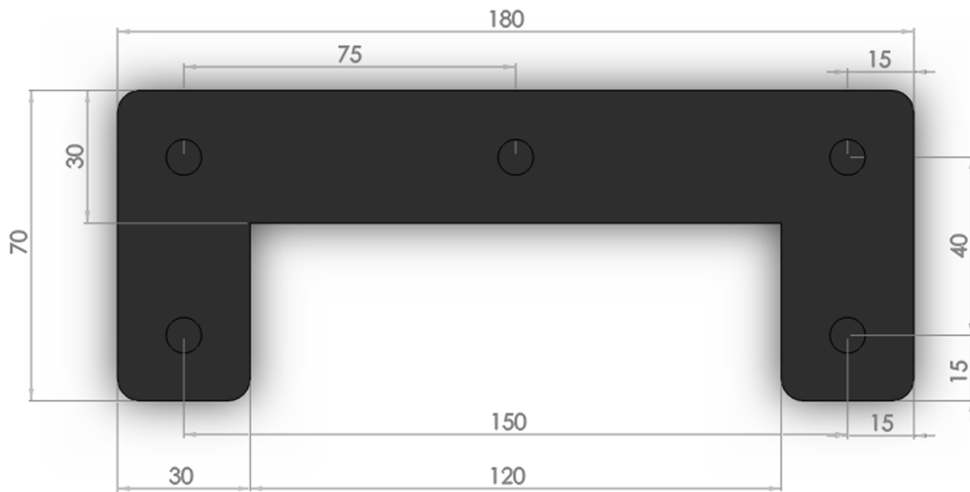


Figura 3.33 Forma del acople de los motores.

Fuente: Elaboración propia.

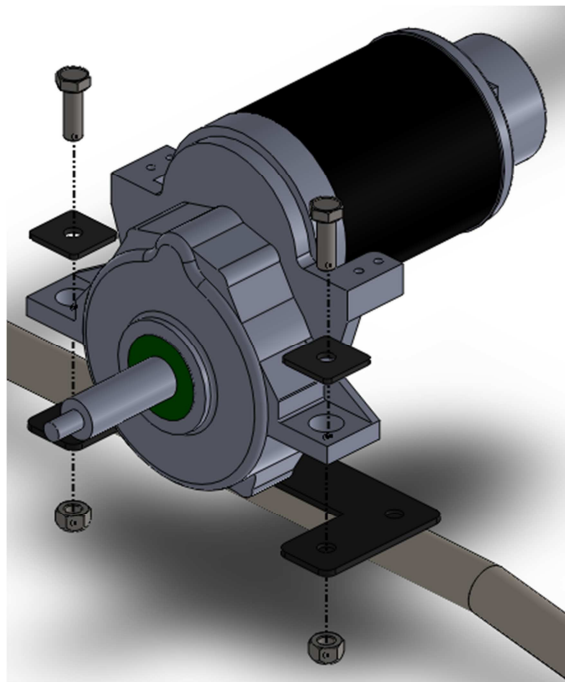


Figura 3.34 Vista explosionada del montaje del motor.

Elaboración propia.

3.5.1.3.4.1 Simulación de deformación del acople de los motores

La carga aplicada sobre el acople para los motores es de aproximadamente 10kg considerando el material, el espesor elegido de este acople es de 3mm. Es importante considerar que el centro de masa del motor está en el área que estará asentada sobre la estructura. Se realiza entonces un estudio de comprobación de la deformación del acople.

Puesto a que este acople estará soldado a la estructura principal, estos extremos se consideran geometrías fijas. Para realizar esta simulación tenemos entonces las siguientes consideraciones:

- Material: Hierro gris.
- Geometrías fijas: extremos soldados a la estructura principal.
- Cuarta parte del peso total del RAD4-23: 10Kg.

En la Figura 3.35 se muestran estas condiciones aplicadas en la simulación. Los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 3.36.

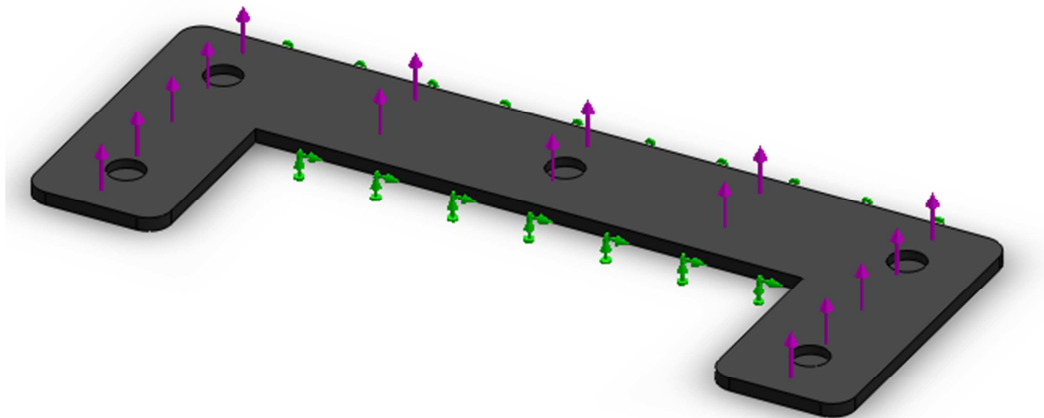
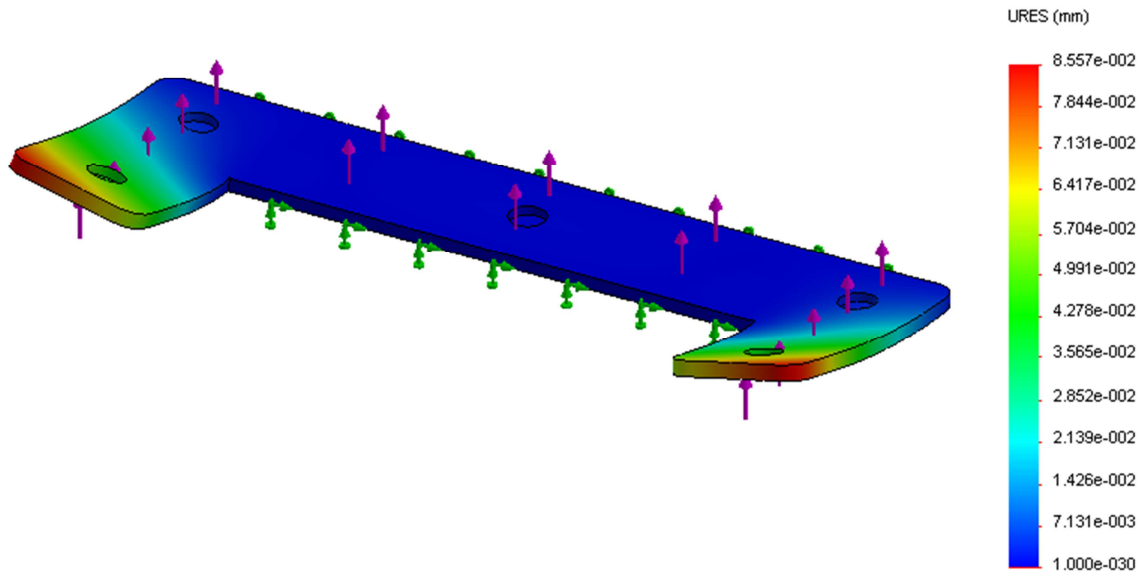
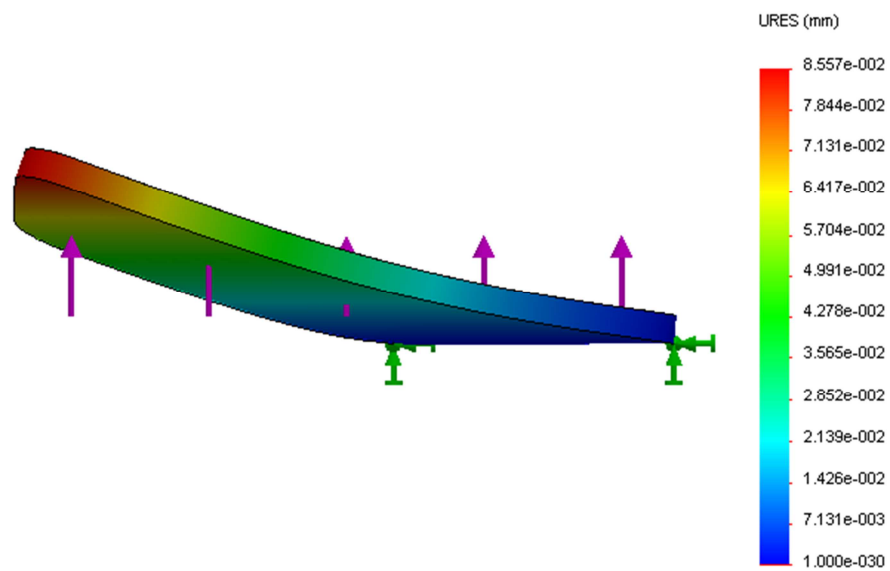


Figura 3.35 Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en el acople de los motores.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.36 Resultados del análisis de desplazamientos en el acople de los motores. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1.3.5 Llantas delanteras

Para la caracterización del motor se propuso un radio de rueda de 0.08m como se menciona en el capítulo 3.5.1.1.1. Se seleccionó una rueda de caucho de 16cm de diámetro a la cual se le realizó un mecanizado para que esta pueda ser adaptada al eje del motor directamente. La llanta será asegurada con una tuerca de seguridad para que al estar sometido el RAD4-23 a vibraciones esta no ceda. El acople de la llanta al eje del motor se muestra en la Figura 3.37 Vista explosionada del montaje de la llanta delantera.

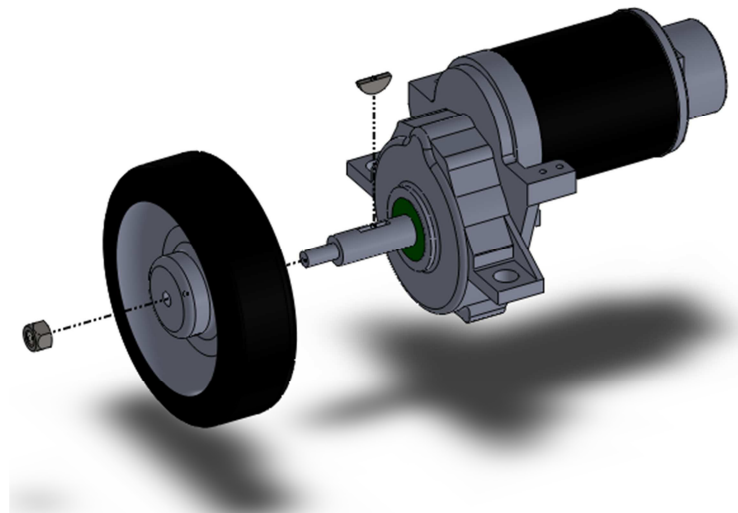


Figura 3.37 Vista explosionada del montaje de la llanta delantera.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.1.3.6 Ruedas locas traseras

Las ruedas locas traseras están soldadas en la última platina posterior de la plancha de soporte de la batería. Se las coloca a una distancia de 6.5 mm del extremo de esta platina, esto para colocarlas lo más al extremo posible para estabilidad, pero evitando que al momento de girar la rueda choque con la estructura de soporte. Esta ubicación se muestra en la Figura 3.38.

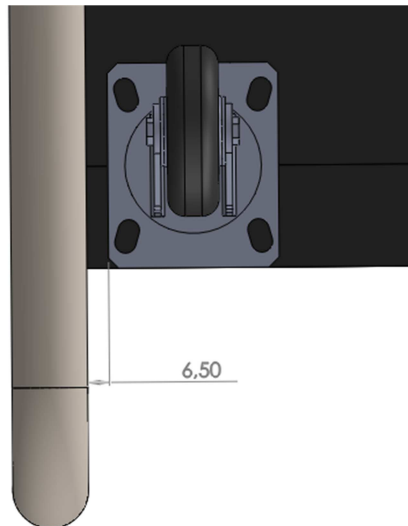


Figura 3.38 Vista inferior de la ubicación de la ruedas loca trasera.

FUENTE: Elaboración propia.

Para que las planchas de soporte se mantengan horizontales al suelo, se buscó que la estructura de soporte no tenga ninguna inclinación. Para lograr esto se midió la distancia desde la platina delantera al piso. Esta medida es de 67mm como se muestra en la Figura 3.39, de manera que el tamaño completo de la rueda loca trasera debe ser bastante cercano a 67mm para evitar que el robot se incline.

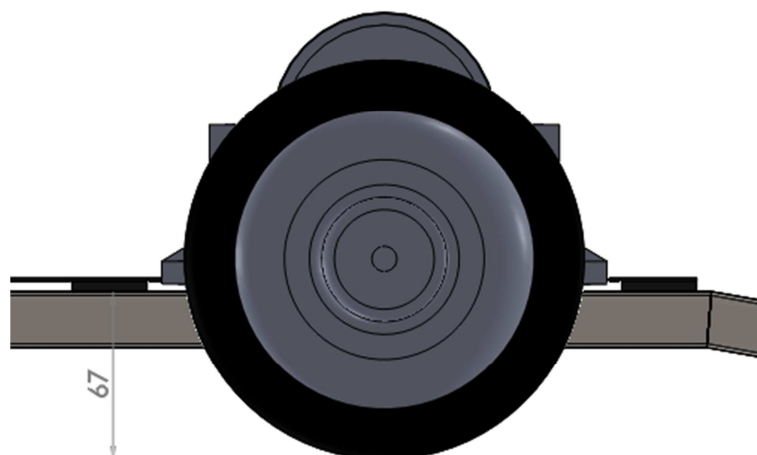


Figura 3.39 Distancia de la platina delantera al suelo.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

Tal como se trató en el capítulo 3.4.2.2 el diseño del sistema de seguimiento y control empieza por el dispositivo de visión artificial para después realizar la selección del computador y del microcontrolador.

3.5.2.1 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema de seguimiento y control consta de:

- Dispositivo de visión artificial.
- Computador.
- Microcontrolador.
- Controlador de motores.

3.5.2.1.1 Dispositivo de visión artificial

La justificación del uso y selección del dispositivo de visión artificial se lo abarca en el capítulo 4. En este capítulo de diseño electrónico se describirán las características del Kinect ya que estas son las que definen las especificaciones mínimas del computador y además las que se utilizarán en el sistema de alimentación.

Las mayores prestaciones requeridas para el computador vienen dadas por el software de desarrollo de Microsoft Kinect para Windows. Los requerimientos mostrados a continuación son los necesarios para utilizar el paquete de desarrollo Microsoft Kinect para Windows SDK 1.5.2. (Microsoft Kinect para Windows SDK V1.5.2, 2012)¹¹:

- Procesador de 32bits o 64bits.
- Procesador Dual-Core de 2.66-GHz o superior.
- USB 2.0 dedicado.
- 2GB de RAM

- Sistema operativo Windows 7 o Windows 7 Embebido Estándar.

Este dispositivo tiene un consumo de corriente aproximado de 1.08A y un voltaje de 12V. Estos datos los obtuvimos al revisar el transformador que viene con el cable de conexión eléctrica del dispositivo, del cual se muestra una imagen en la Figura 3.40.

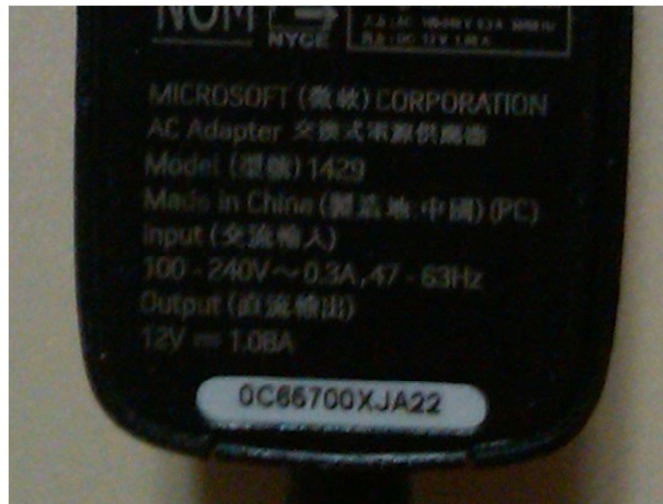


Figura 3.40 Características del adaptador de corriente de Microsoft Kinect para Windows.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.2.1.2 Computador

El robot está controlado por un computador central, el cual debe cumplir ciertos requerimientos dependiendo de los elementos a utilizar. En el capítulo anterior se trató los requerimientos mínimos del dispositivo Microsoft Kinect, el cual es el elemento que exige las mayores prestaciones de parte del computador.

Estos requerimientos son los recomendados para el correcto funcionamiento del sensor Kinect en un computador personal. Es necesario tomar en cuenta que un computador portátil (laptop) no sería una opción válida para un diseño comercial, debido a que en nuestro computador no necesitamos de ciertos periféricos como mouse, teclado o incluso pantalla. En la interfaz de usuario se busca solamente recibir una respuesta de audio cuando alguna acción sea

ejecutada y sea necesario dar conocimiento al usuario. Por lo que al utilizar un computador portátil se desperdiciarían recursos en otros periféricos, e incluso en procesos innecesarios. Para evitar que se ejecuten procesos innecesarios el sistema operativo que será instalado en el computador será Microsoft Windows 7 Embebido Estándar.

Al buscar alternativas de computadores que se ajusten o superen estas especificaciones. Se encontró dos alternativas como computador central:

- Mamba SBC EBX-37 (VERSALOGIC CORPORATION, 2013)¹².
- Apple Mac Mini Core i5 2.5 (EveryMac.com, 2013)¹³.

A continuación se analizan cada una de las alternativas.

3.5.2.1.2.1 Mamba SBC EBX-37

Este es un computador a bordo embebido (Embedded Single Board Computer) utilizado en diferentes aplicaciones tales como médicas, seguridad, defensa, transporte y aplicaciones industriales debido a su rápido procesamiento de grandes cantidades de datos. Su diseño es apto donde se exige alta confiabilidad y largos tiempos de disponibilidad. Al ser un procesador específicamente diseñado para aplicaciones embebidas este procesador es una opción válida para el RAD4-23. En la Figura 3.41 se muestra una imagen de este computador.

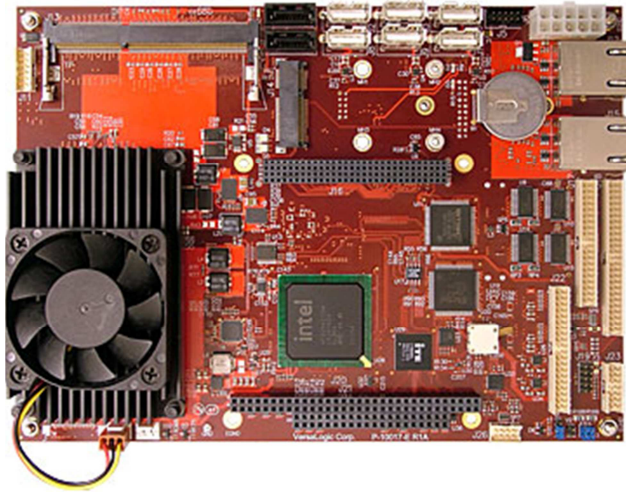


Figura 3.41 Mamba EBX SBC con Intel Core 2 Duo.

FUENTE: Versalogic, productos. Recuperado de:
<http://www.versalogic.com/products/Photopage.asp?ProductID=215>, Inglés, 2013.

Existen varias aplicaciones de robots móviles que utilizan este computador como por ejemplo el robot Pioneer P3-DX, el cual se muestra en la Figura 3.42.



Figura 3.42 Pioneer P3-DX.

FUENTE: adept mobilerobots, productos. Recuperado de:
<http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/Pioneer3DX-P3DX-RevA.sflb.ashx>, Inglés, 2011.

En este ejemplo de robot móvil, se ocupa toda la funcionalidad del computador, ya que además de ser un procesador industrial, este tiene entradas y

salidas análogas al igual que digitales, por lo tanto se puede evitar el uso de un microcontrolador ya que el Mamba EBX puede ser programado para controlar todas estas entradas y salidas. A continuación se detallan las especificaciones de este computador más relevantes para este proyecto:

Tabla 3.5 Especificaciones MAMBA SBC EBX-37

General	Tamaño	146mm x 203mm x 30mm
	Peso	0.72 Kg
	Procesador	Intel Core 2 Duo (P8499) 2.26GHz. 3MB L2 de cache con protección de temperatura.
	Requerimientos de potencia	Típico: 18.5W Máximo: 25W
	Puertos de expansión de entrada y salida	Socket para PCI Express Mini Card. Interfaz SPX.
Memoria	RAM del sistema	2 sockets SO-DIMM. Hasta 8GB DDR3 SDRAM.
Almacenamiento	Disco duro	2 puertos SATA (Revisión 2.0)
Dispositivos de entrada y salida	USB	6 puertos USB 2.0
	Entradas Analógicas	8 Canales estándar
		16 canales personalizados
		Rangos de entrada de 0 a +5V, ±5V, 0 a +10V y ±10V. 12-bit a 100Ksps.
	Salidas Analógicas	4 Canales estándar
		8 Canales personalizados
		Rango de salida de 0 a +4.096V. 12-bit a 100Ksps.

	Entradas/Salidas Digitales	32 líneas TTL de 3.3V independientemente configurables.
	Audio	salida/entrada Audio HD
Software	Sistemas Operativos	Compatible con la mayoría de sistemas operativos de 32bits incluyendo Windows, Windows Embebido, Linux, VxWorks, y QNX.

FUENTE: VERSALOGIC CORPORATION. Productos. Recuperado de:
<http://versalogic.com/products/ds.asp?productid=215>, Inglés, 2013.

Al utilizar este computador tenemos grandes ventajas ya que lo podemos alimentar utilizando el nivel de voltaje de la batería de 12V, que se utilizará para el motor, junto con un regulador por seguridad. Podemos conectar el Kinect a uno de los puertos USB y el puente H junto con los sensores a las entradas y salidas del mismo computador eliminando la necesidad de un microcontrolador. Con estas características ahorramos espacio y tendríamos un bajo consumo de energía, por lo cual esta sería una buena alternativa.

3.5.2.1.2.2 Apple Mac Mini Core i5 2.3 (Mediados del 2011)

Este computador no tiene características industriales, al ser un computador personal. Sin embargo tiene características que lo convierten en una buena opción para ser el cerebro de varias aplicaciones robóticas. La primera de ellas es su tamaño reducido comparado con sus grandes prestaciones. El Mac Mini tiene disponibles modelos en la actualidad con procesadores Dual-Core Intel Core i5 de 2.5Ghz o Quad-Core Intel Core i7 de 2.3GHz, en un tamaño aproximado de 19cm x 19cm x 3.6cm. Su pequeño tamaño lo vuelve adaptable a aplicaciones de robots móviles. Tener un procesador poderoso como cerebro de un robot móvil permite realizar procesos que demanden grandes prestaciones, como por ejemplo realizar visión artificial a grandes velocidades junto a otros procesos trabajando en paralelo. En la Figura 3.43 se muestra una foto de este computador.



(a)



(b)

Figura 3.43 Apple Mac Mini Core i5 2.3. (a) Vista frontal. (b) Vista posterior.

FUENTE: Soporte Apple, Mac Mini. Recuperado de:
http://support.apple.com/kb/SP632?viewlocale=es_ES, Inglés, 2013.

Como ejemplo de aplicación a nivel de robots móviles tenemos el robot bTop, el cual se muestra en la Figura 3.44.

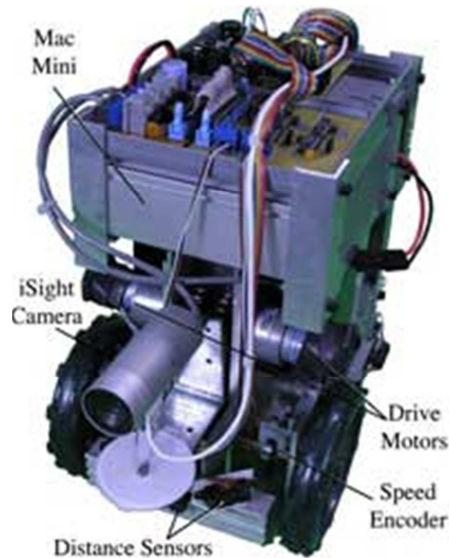


Figura 3.44 Robot bTop.

FUENTE: High Earth Orbit. Proyectos. Recuperado de:
<http://highearthorbit.com/project/macmini-robot/>. Inglés. 05 de marzo del 2013.

Este robot móvil utiliza una placa bTop creada por George Storm (Desarrollador Macintosh), la cual le permite a un computador personal tener tanto entradas y salidas digitales como entradas y salidas analógicas permitiendo de esta manera a un computador común realizar tareas de hardware de bajo nivel. Esta placa se comunica con el computador utilizando un puerto USB 2.0 permitiendo a los desarrolladores utilizar sus características. En esta aplicación del Mac Mini, el robot tiene diferentes sensores tales como de distancia, sensores para seguimiento de línea, visión artificial y un arreglo de micrófonos para recibir comandos de voz. Según su creador es posible agregar diferentes características extras sin preocuparse por la capacidad computacional debido al uso del poderoso procesador del Mac Mini. A continuación se detallan las especificaciones del Mac Mini Core i5 2.3 (Mediados del 2011) más relevantes para este proyecto:

Tabla 3.6 Especificaciones Mac Mini Core i5 2.3 (Mediados del 2011)

General	Tamaño	197mm x 197mm x 36mm
---------	--------	----------------------

	Peso	1.22Kg.
	Procesador	Intel Core i5 de 2.3GHz (2415M). 3MB L3 de caché.
	Requerimientos de potencia	Típico: 38W Máximo: 85W
Memoria	RAM del sistema	Memoria DDR3 de 2GB de 1333 MHz, configurable hasta 8GB.
Almacenamiento	Disco duro	500GB (5400RPM) SATA (Revisión 2.0)
Dispositivos de entrada y salida	USB	4 puertos USB 2.0
	Entradas Analógicas	No disponible (Necesita de la tarjeta bTop).
	Salidas Analógicas	No disponible (Necesita de la tarjeta bTop o un microcontrolador).
	Entradas/Salidas Digitales	No disponible (Necesita de la tarjeta bTop o un microcontrolador).
	Audio	salida/entrada Audio HD
Software	Sistemas Operativos	MacOs X 10.7 Preinstalado. Compatible con sistemas operativos Windows de 32bits y 64bits incluyendo Windows Embebido Estándar.

FUENTE: EveryMac.com, Mac Mini. Recuperado de:

http://www.everymac.com/systems/apple/mac_mini/specs/mac-mini-core-i5-2.3-mid-2011-specs.html, Inglés, 2013.

Este computador tiene la ventaja de su gran poder en comparación con la mayoría de computadores a bordo embebidos, y de igual manera que el Mamba EBX lo podemos conectar directamente a la batería de 12V utilizando un cable especial del cual se habla en el capítulo 3.5.4.1.1.3, agregando igualmente un regulador de voltaje para protección. La desventaja de este computador es que al ser un computador personal, no tiene hardware de bajo nivel como entradas y salidas digitales, por lo cual es necesario utilizar una placa bTop o un microcontrolador como interfaz entre el computador, puente H y sensores.

3.5.2.1.2.3 Selección del computador

Una vez analizadas las dos alternativas es necesario ponerlas en comparación para ello tomaremos en cuenta funcionalidad, memoria RAM, disco duro incluido, capacidad computacional, consumo de potencia y precio. Esta comparación se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Comparación de alternativas de computador.

Característica	Mamba EBX	Mac Mini
Procesador	Intel Core 2 Duo de 2.26GHz. 3MB L2 de caché	Intel Core i5 de 2.3GHz. 3MB L3 de caché.
Memoria RAM incluida	No disponible (Necesario comprar)	2GB DDR3 de 1333 MHz
Disco duro	No disponible (Necesario comprar)	500GB (5400 RPM) SATA.
Hardware de bajo nivel (Entradas y salidas digitales o analógicas)	Varias entradas y salidas tanto analógicas como digitales.	No disponible (Necesario comprar hardware adicional).
Consumo de potencia típico	18.5W	38W
Precio	US\$1430	US\$599

FUENTE: Elaboración propia.

Como se puede apreciar a primera vista en la Tabla 3.7 la diferencia de precio entre el Mamba EBX y el Mac Mini es de casi 2.5 veces. Esto debido a que el Mamba EBX tiene protecciones industriales debido a sus aplicaciones. Sin embargo para los fines de este proyecto no son indispensables esas características. La ventaja que obtendríamos además del Mamba EBX es su amplia capacidad de entradas y salidas digitales y analógicas. No obstante, el utilizar un microcontrolador junto con el Mac Mini supondría un costo adicional de US\$110 dólares aproximadamente por diseño de PCB y compra del microcontrolador, lo cual lograría un precio de apenas la mitad del Mamba EBX. Sumado a esto el Mamba EBX necesita memoria RAM y disco duro por lo que su precio aumentaría aún más. También es necesario considerar que la capacidad del procesador del Mac Mini es superior a la del Mamba EBX. Por estas razones y por los fines del proyecto, además del objetivo de buscar un bajo costo para el cliente, la mejor opción para este proyecto es el computador Mac Mini.

3.5.2.1.2.4 Salida de audio

La mayor parte del tiempo el usuario estará dando las espaldas al RAD4-23 mientras este lo sigue, por esta razón el usuario no podrá notar ninguna clase de indicador visual. Estos indicadores se utilizan para informar ciertas acciones realizadas por el robot o las alarmas que se puedan presentar. Por esta razón para poder dar a conocer al usuario esta información se decide utilizar comandos de voz.

Los comandos de voz son pistas de audio que se reproducen cuando se disparan ciertos eventos o alarmas, por ejemplo, cuando ya se reconoció al usuario o cuando se pierde el reconocimiento del usuario. No obstante al elegir un computador como el Mac Mini o un computador a bordo, estos no tienen salida de audio integrada, por lo que es necesario añadir un dispositivo periférico para poder emitir estas señales de audio.

Utilizar un altavoz que necesite baterías supondría un problema debido a que se deberían recargar las mismas. Por esta razón se buscó un parlante que reciba la alimentación desde un puerto USB del computador. Se encontró un

altavoz que cumple con este requerimiento y que además tiene una forma fácilmente adaptable al RAD4-23, el mismo que se muestra en la Figura 3.45.



Figura 3.45 Altavoz iSound GoSonic.

FUENTE: iSound, Productos. Recuperado de: <http://www.isound.net/shop-by-type/speakers/gosonic.html>, Inglés, 2013.

3.5.2.1.3 Microcontrolador

Como se explicó en el capítulo 1043.5.2.1.2.3, debido al uso de un computador de tipo personal será necesario una interfaz entre este y los sensores y puente H para control de los motores. Como solución se decide utilizar un microcontrolador para que funcione de interfaz. En nuestro país los microcontroladores más utilizados son de la marca ATMEL y la marca MICROCHIP, con sus diferentes modelos, lenguajes y ambientes de programación.

Estos microcontroladores se pueden comprar en versiones de montaje superficial y through-hole (A través de orificio) dependiendo del modelo. Para lo cual es necesario diseñar un PCB donde consten los diferentes elementos para el funcionamiento del microcontrolador, como el cristal, botón de reset, fuente, etc. Además la comunicación entre el computador y el microcontrolador necesita de un circuito adicional para su funcionamiento.

Para facilitar y agilizar tanto el diseño como la programación se opta por utilizar una placa Arduino (Arduino, 2013)¹⁴, la cual tiene todos los elementos antes explicados. Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos.

Es necesario recalcar además que al utilizar Arduino, las librerías para diferentes dispositivos ya están creadas por otros usuarios en una comunidad de código abierto, lo que facilita al resto de usuarios el uso de una gran variedad de sensores, actuadores, pantallas, audio, etc. Al utilizar una placa Arduino podremos dedicar el tiempo de programación directamente a las funciones del RAD4-23 y no a la programación de sensores y manejo del puente H.

Debido al número de entradas y salidas digitales necesarias por el uso de sensores y de los pines necesarios para el manejo del puente H, la placa Arduino que se adapta a las necesidades del RAD4-23 es el Arduino Mega 2560 R3. El resumen de las especificaciones del mismo se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Especificaciones Arduino Mega 2560 R3.

Característica	Valor o capacidad
Microcontrolador	ATmega2
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada(limites)	6-20V
Pines de entrada y salida digitales	54 (De los cuales 15 proveen salidas de PWM)
Entradas analógicas	16
Corriente DC por pin de entrada y salida	40mA
Corriente DC para pines de 3.3V	50mA
Memoria FLASH	256KB de los cuales 8KB son usados por el bootloader

SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad de reloj	16MHz

FUENTE: Arduino, productos. Recuperado de: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, Inglés, 2013.

El Arduino Mega puede ser alimentado desde la conexión USB o a través de una fuente externa, y la selección de la fuente es automática por parte del Arduino. Por esta razón se opta por utilizar como alimentación el puerto USB de la computadora para evitar el diseño de una fuente externa. En la Figura 3.46 se muestra una imagen del Arduino Mega 2560 R3.

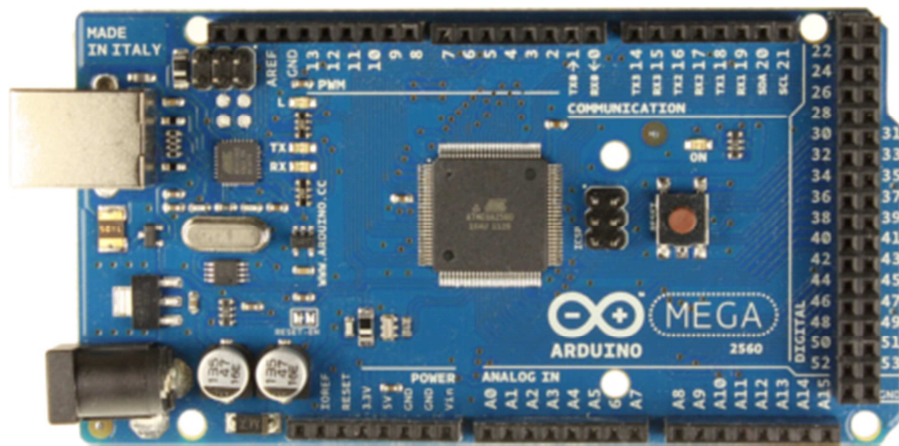


Figura 3.46 Arduino Mega 2560 R3.

FUENTE: Arduino, productos. Recuperado de: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, Inglés, 2013.

En el Anexo B se muestra el diagrama esquemático del Arduino Mega 2560.

3.5.2.1.4 Controlador de motores

El diseño del controlador de motores se trató anteriormente en el capítulo 3.5.1.2.1 ya que este forma también parte del sistema motriz y estructura.

3.5.2.2 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema de seguimiento y control consta de:

- Sujeción del dispositivo de visión artificial.
- Protección del dispositivo de visión artificial.
- Carcasa de sujeción para el computador.
- Sujeción del microcontrolador.
- Sujeción del controlador de motores.
- Estructura para el altavoz.

3.5.2.2.1 Sujeción del dispositivo de visión artificial

La sujeción del dispositivo artificial Kinect, se basó en un clip de montaje especial para el dispositivo Kinect mostrado en la Figura 3.47.



Figura 3.47 Clip de montaje para Kinect.

FUENTE: Microsoft Store, productos. Recuperado de:

http://www.microsoftstore.com/store/msca/en_CA/pdp/ThemeID.27659600/productID.258280500,

Inglés, 21 de abril del 2013.

El dispositivo de montaje se modificó de tal manera que se acople a la plancha de soporte del Kinect, se removió la parte trasera de sujeción a televisores.

El clip de montaje será sujeto a la plancha con pegamento, para que este quede totalmente fijo e inmóvil, el Kinect es el único que tendrá la posibilidad de ser removido y colocado con ayuda del mecanismo que tiene el clip de montaje. El montaje del dispositivo de visión artificial se muestra en la Figura 3.48.

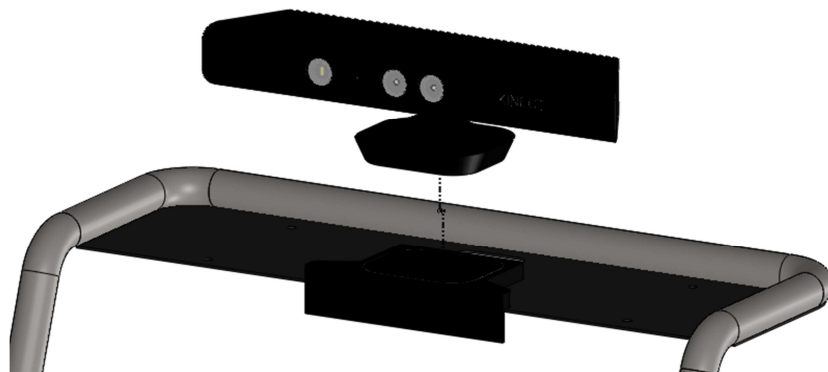


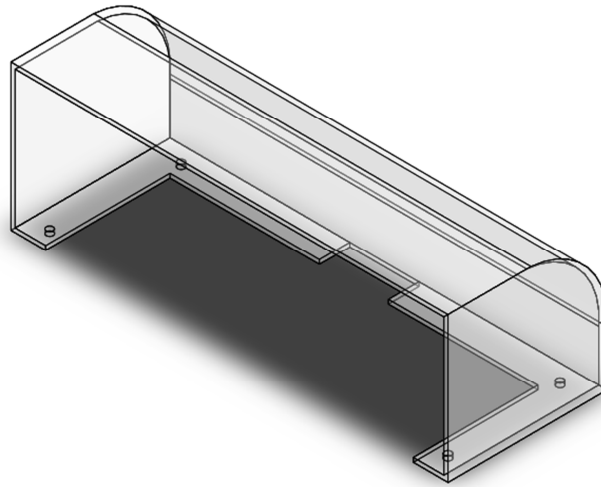
Figura 3.48 Vista explosionada del montaje del Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

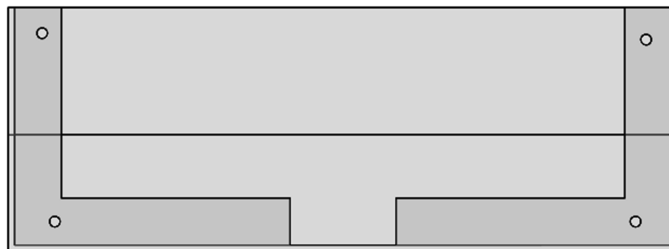
3.5.2.2.2 Protección del dispositivo de visión artificial

El dispositivo Microsoft Kinect es un elemento delicado por lo que se debe tener ciertas protecciones. La principal precaución tiene que ver con el motor que realiza el movimiento vertical del enfoque del Kinect. Este motor está ubicado dentro de la base en la parte inferior del Kinect y está conectado a través de un conjunto de engranes y un pequeño brazo a la parte superior del mismo. Si es que por alguna circunstancia el Kinect llegara a ser golpeado o alguien se arrimara sobre el mismo se podría destruir este pequeño mecanismo. Además de que se debe evitar que los usuarios intenten tocar el dispositivo.

Para brindarle protección al dispositivo se diseña un cobertor de acrílico tal como se muestra en la Figura 3.49. El montaje del protector a la plancha de soporte del Kinect se lo realiza utilizando pernos M3, este montaje se muestra en la Figura 3.51.



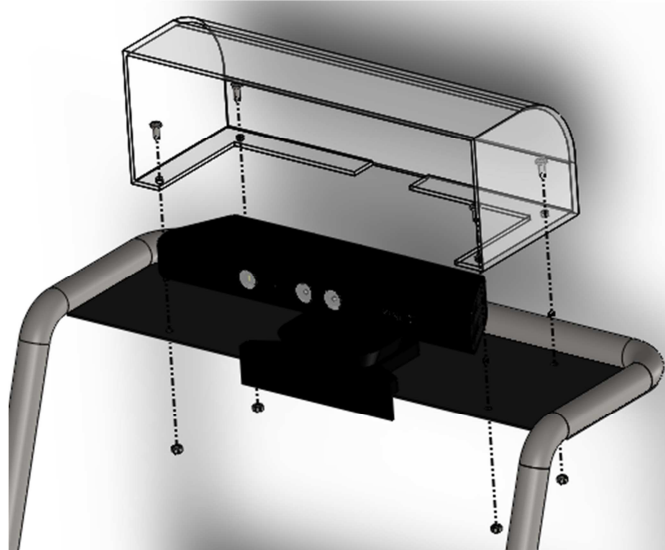
(a)



(b)

Figura 3.49 Cobertor para el dispositivo Microsoft Kinect. (a) Vista isométrica. (b) Vista inferior.

FUENTE: Elaboración propia.



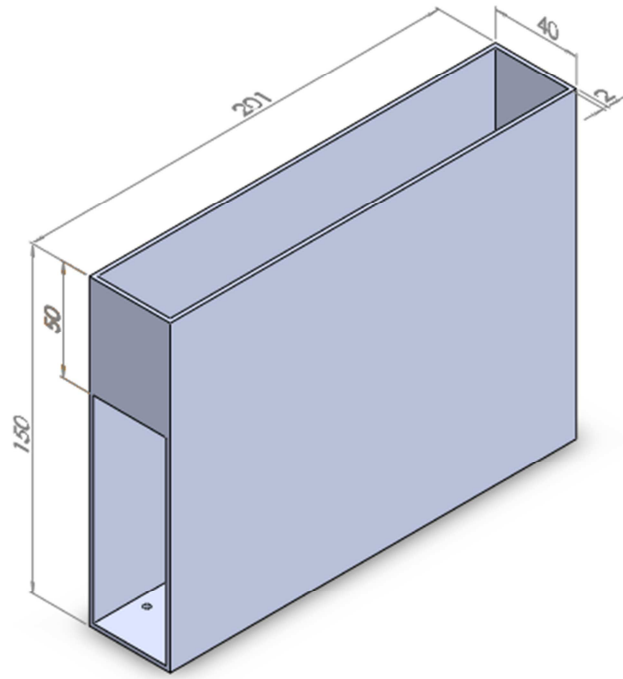
**Figura 3.50 Vista explosionada del montaje del cobertor del dispositivo
Microsoft Kinect.**

FUENTE: Elaboración propia.

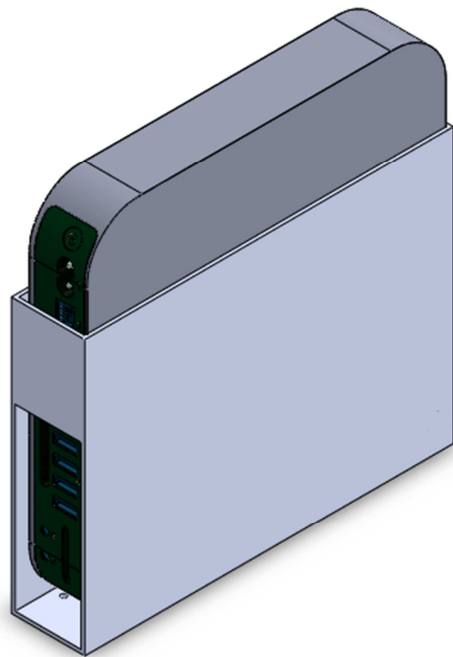
3.5.2.2.3 Carcasa de sujeción para el computador

Como se explica en el capítulo 3.5.2.1.2.3 el computador a utilizar es un Mac Mini, el mismo que estará ubicado en la plancha de soporte para la batería. El problema se genera debido a que este no tiene elementos para sujetarlo, por esta razón es necesario utilizar un elemento de sujeción extra para que este se mantenga inmóvil respecto al RAD4-23. En este caso realizamos una carcasa en acrílico en el cual se depositará el Mac Mini posicionado verticalmente.

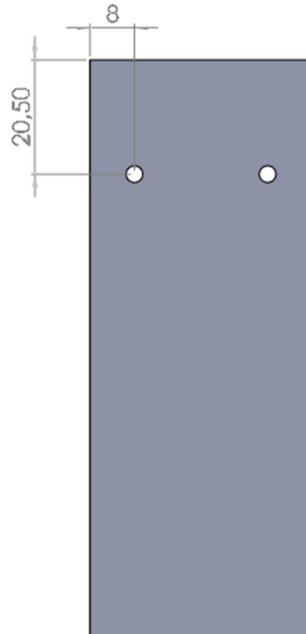
Esta carcasa estará sujeta a la plancha de la batería a través de 4 pernos M3 cuyos agujeros están en la cara inferior del mismo. La carcasa está diseñada con un agujero rectangular para que permita realizar las conexiones del cable USB del Kinect y del Arduino Mega. Una vez depositado el Mac Mini en este case, el computador sobresaldrá una distancia aproximada de 5cm. En la Figura 3.51 se muestra las dimensiones de esta carcasa, el conjunto con el Mac Mini y la posición de los agujeros para los pernos M3.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.51 Carcasa de sujeción para el computador. (a) Vista isométrica. (b) En conjunto con el computador. (c) Posición de los agujeros para pernos M3.

FUENTE: Elaboración propia

La ubicación del Mac Mini es en la parte posterior de la plancha para soporte de batería, en una posición entre las 2 platinas posteriores. Esto es a una distancia de 66mm respecto al filo posterior y de 60mm respecto al filo lateral. Esta ubicación se muestra en la Figura 3.52, donde la plancha inferior está transparente para poder notar la ubicación.

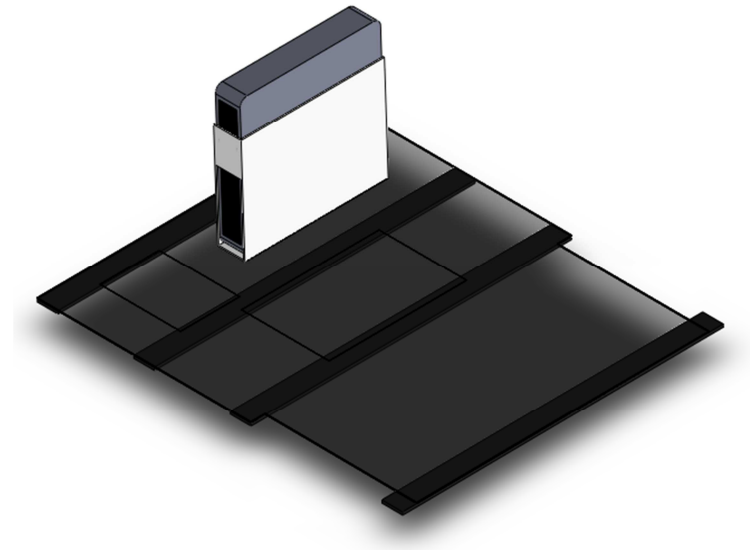


Figura 3.52 Ubicación del Mac Mini en la plancha de soporte para batería.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.2.2.4 Sujeción del microcontrolador

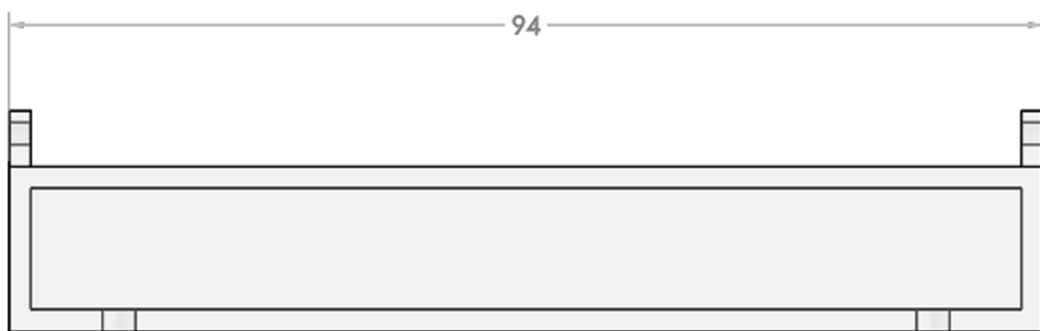
El Arduino Mega tiene agujeros en su placa electrónica para colocar pernos M3 y de esta manera ubicarlo donde sea necesario. En nuestro caso se optó por ubicar el Arduino Mega sobre la placa electrónica para conexión de elementos la cual se diseña en el capítulo 3.5.4.2.1. Esto debido a que se desea que en la placa de conexión estén ubicadas tanto las fuentes como la interfaz entre el computador, motores y sensores.

3.5.2.2.5 Sujeción del controlador de motores

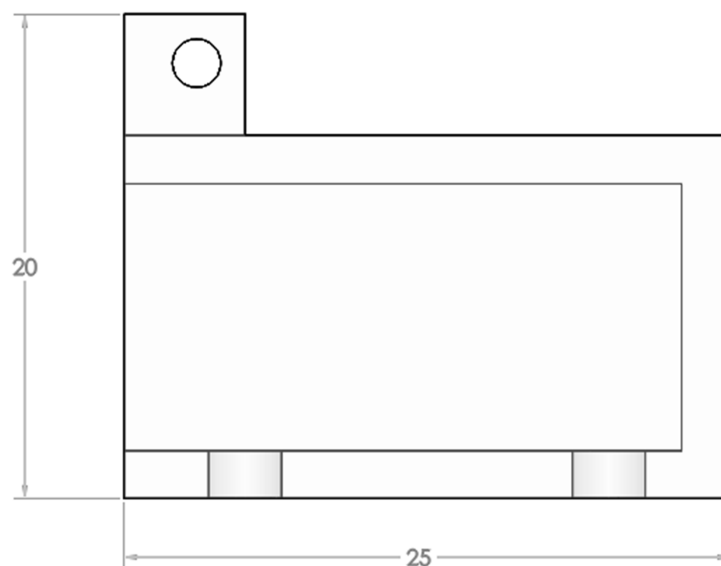
La sujeción del controlador de motores se trató anteriormente en el capítulo 3.5.2.1.4 ya que este forma también parte del sistema motriz y estructura. La sujeción del mismo es sencilla debido a que es compatible con los pines de las placas Arduino y solo es necesario colocarlo encima del Arduino Mega.

3.5.2.2.6 Estructura de soporte para el altavoz

Para la fijación del altavoz se diseñó una estructura de acrílico de 94mm de largo, 25mm de ancho y 20mm de alto, mostrada en la Figura 3.53. En esta estructura será montado el altavoz de tal manera que la cara frontal del parlante sobresalga de la estructura.



(a)



(b)

Figura 3.53 Estructura de soporte para altavoz. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

El montaje del altavoz se lo realizará por medio de pernos M3, los cuales sujetan el parlante a una pestaña de 5mm x 5mm como se muestra en la Figura 3.54 Montaje de altavoz y estructura. Además la estructura de acrílico será sujeta a la plancha inferior del RAD4-23 por medio de cuatro pernos M3.

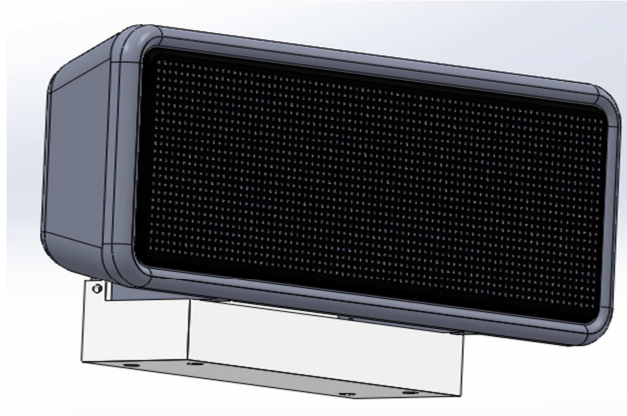


Figura 3.54 Montaje de altavoz y estructura.

FUENTE: Elaboración propia.

El altavoz dentro del RAD4-23 se lo ubica en la parte delantera debajo de los sensores ultrasónicos, de tal manera que este sobresalga para que se pueda emitir el audio sin obstáculos que tapen la salida del sonido.

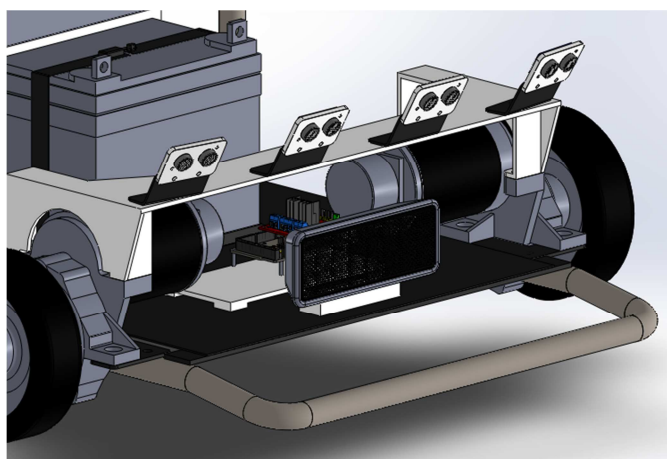


Figura 3.55 Ubicación del altavoz en el RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

Tal como se indicó en el capítulo 3.4.3.2 dentro del diseño del sistema de detección y control solamente se trata los sensores debido a que el computador y el microcontrolador se tratan en el diseño del sistema de seguimiento y control.

3.5.3.1 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema de detección trata la selección, conexión y ubicación de los sensores.

3.5.3.1.1 Sensores

Para el óptimo funcionamiento del RAD4-23, una de las funciones que este debe realizar es la detección de objetos extraños que impidan el correcto seguimiento del usuario. Por lo que se debe añadir sensores que nos ayuden a detectar este tipo de obstáculos. En la parte delantera del robot se busca reconocer objetos extraños para evitar colisiones y en la parte trasera se busca evitar colisiones al momento de realizar giros.

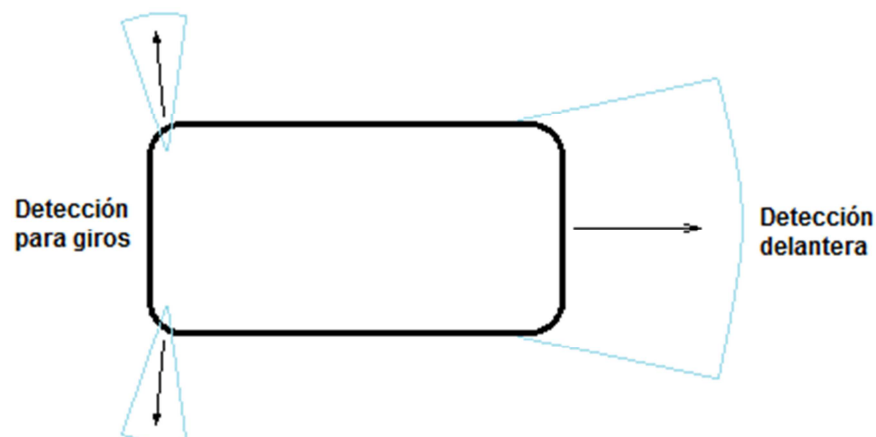


Figura 3.56 Zonas de detección.

FUENTE: Elaboración propia.

Para poder seleccionar los sensores adecuados para este propósito, se puntuará las características más relevantes para este proyecto de diferentes tipos de sensores tomando en cuenta las necesidades respectivas. Uno de los más importantes es el rango lateral de detección respecto al eje neutro al cual apunta el sensor, debido a que se desea cubrir un área de al menos 80% en la parte frontal del RAD4-23 para su correcto funcionamiento.

Lo que se busca es detección de obstáculos a través de distancia o presencia. Solo se toman en cuenta sensores que detecten materiales tanto metálicos como no metálicos.

Tabla 3.9 Selección de sensores

Característica	Capacitivo	Fotoeléctrico	Ultrasónico	Selección
Disponibilidad en el mercado	Escaso	Escaso	Buena disponibilidad	Ultrasónico
Rango de reconocimiento	Bajo	Alto	Alto	Ultrasónico Fotoeléctrico
Velocidad de reacción	Rápida	Rápida	Lenta	Fotoeléctrico
Rango lateral	Muy bajo	Muy bajo	Medio	Ultrasónico

FUENTE: Elaboración propia.

Como se puede notar en la Tabla 3.9 los sensores ultrasónicos son los que nos ofrecen mayores ventajas para cumplir con nuestro objetivo, principalmente por disponibilidad en el mercado y rango lateral de detección. Los sensores ultrasónicos que se optaron por utilizar son los sensores HC-SR04. En la Figura 3.57 se muestra un sensor HC-SR04.

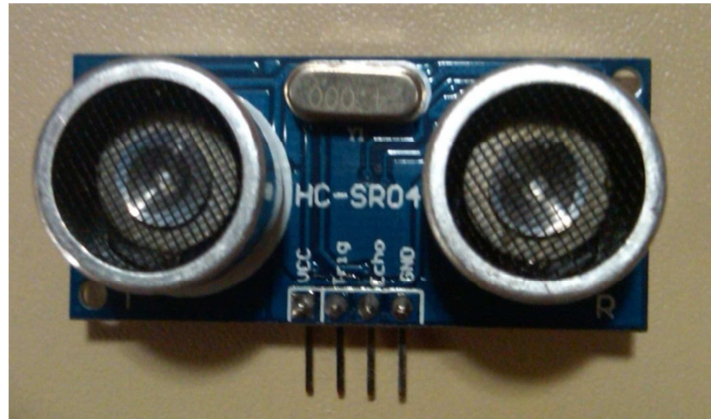


Figura 3.57 Sensor ultrasónico HC-SR04.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.1.1.1 Conexión de sensores

Estos sensores tienen 4 pines, dos de control (Trigger y Echo) y dos de alimentación (VCC y GND) los que serán distribuidos de la siguiente manera:

- Los pines de alimentación van conectados a la placa electrónica para conexión de elementos en las borneras S1, S2, S3, S4, S5 o S6, según corresponda cada sensor. Los sensores S1, S2, S3 y S4 son los sensores delanteros de izquierda a derecha viendo el RAD4-23 de frente. El sensor S5 es el sensor derecho trasero y el sensor S6 es el sensor izquierdo trasero.
- En cada bornera el pin VCC está conectado al borne “+” y el pin GND al borne “-”.
- Los pines de control están conectados a la placa del Arduino Mega 2560 R3 en los pines digitales de la parte derecha en la posición que se muestra en la Figura 3.58, de la siguiente manera:
 - S1: Trigger pin 24, Echo pin 22.
 - S2: Trigger pin 28, Echo pin 26.
 - S3: Trigger pin 34, Echo pin 32.
 - S4: Trigger pin 40, Echo pin 38.
 - S5: Trigger pin 46, Echo pin 44.
 - S6: Trigger pin 52, Echo pin 50.

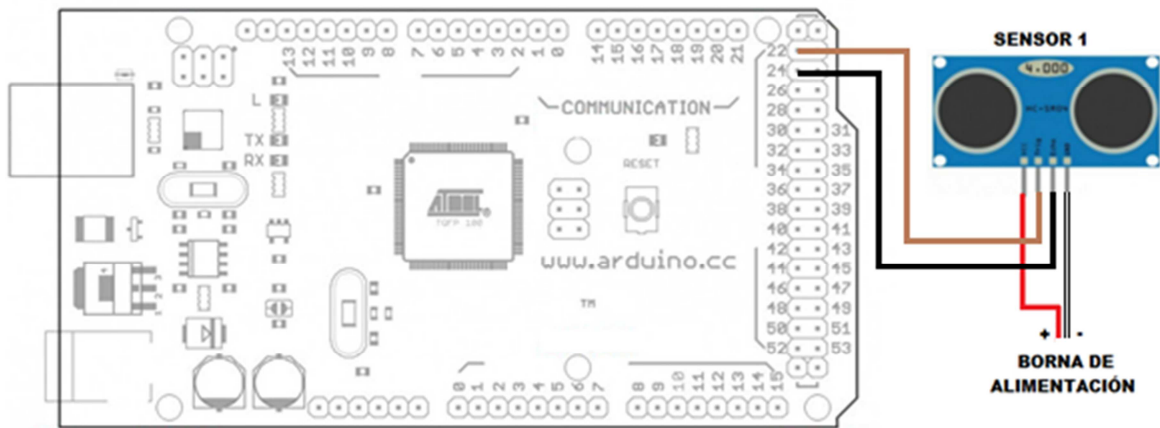


Figura 3.58 Conexión de sensores (Ejemplo con sensor S1).

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.3.1.1.2 Ubicación de sensores delanteros

Se necesitan sensores adelante del RAD4-23 que permitan la detección de objetos ubicados al nivel del piso, para evitar cualquier colisión o destrucción del objeto. Además nos sirven para detectar si el usuario está muy cerca para prevenir una colisión con el mismo.

Los sensores tienen un rango de reconocimiento de más de un metro de largo y una abertura de 15° desde el centro del sensor. Por lo que se realizó los cálculos encontrando que se necesitan 4 sensores a 140mm de separación uno del otro. Tomando en cuenta que para que se cubra al menos el 80% del rango, los sensores de los extremos deben ser girados 15° a su respectivo lado, respecto de la recta de los sensores del medio, como se muestra en la Figura 3.59

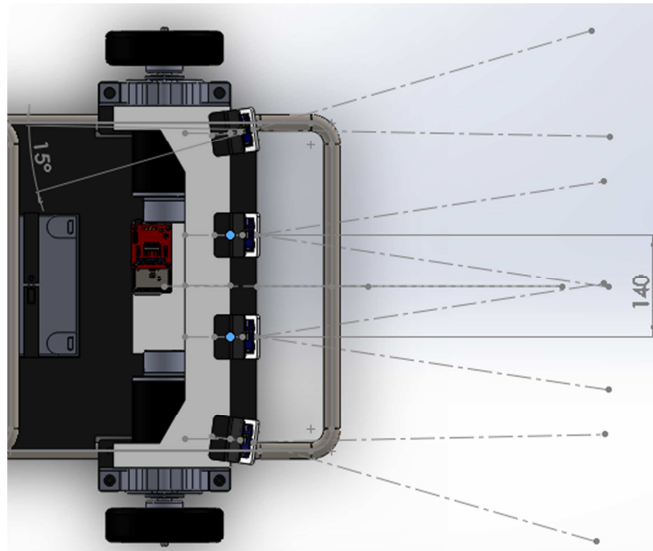


Figura 3.59 Ubicación entre sensores delanteros.

FUENTE: Elaboración propia.

El objetivo de los sensores delanteros es reconocer objetos que estén en el piso, por lo que se realizó el cálculo de la distancia al piso para dar cierta inclinación a los sensores de tal manera que el reconocimiento sea óptimo.

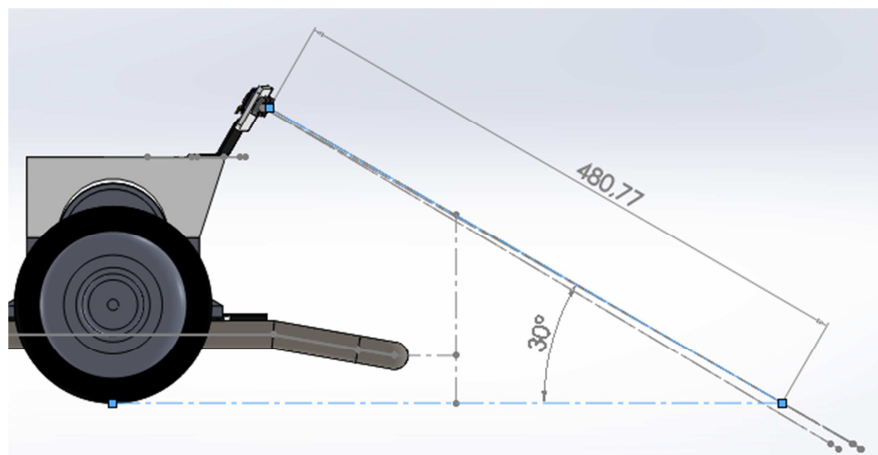


Figura 3.60 Inclinación de sensores delanteros.

FUENTE: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 3.60 el rango de reconocimiento será de un máximo de 48cm. Mediante programación se configuran los sensores para que al detectar una distancia menor a esta se reconozca como una posible colisión.

3.5.3.1.1.3 Ubicación de sensores traseros

Se necesitan 2 sensores ultrasónicos atrás del RAD4-23 que permitan la detección de objetos que representen un peligro de colisión al momento de realizar los diferentes tipos de giro, uno en cada lado para evitar cualquier colisión al momento de girar a la izquierda o a la derecha.

Se utilizan los mismos sensores que en la parte delantera, por lo cual tienen los mismos rangos de detección. Se ubica un sensor en cada lado, debajo del soporte del Kinect, ya que esta parte es el extremo del giro del RAD4-23, como se muestra en la Figura 3.61.

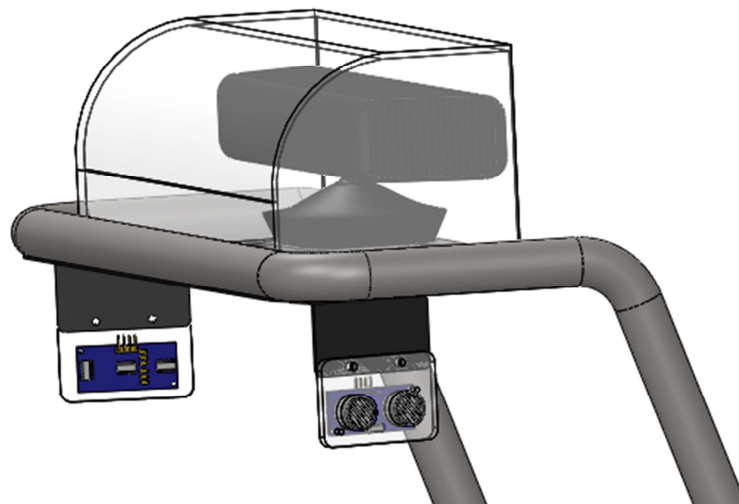


Figura 3.61 Ubicación sensores traseros.

FUENTE: Elaboración propia.

Para que la detección de los objetos sea más efectiva, se giran los 15° con respecto al lado derecho o izquierdo del soporte del Kinect según corresponda

como se muestra en la Figura 3.62. Con esta posición los sensores podrán detectar el objeto un poco antes durante el giro.

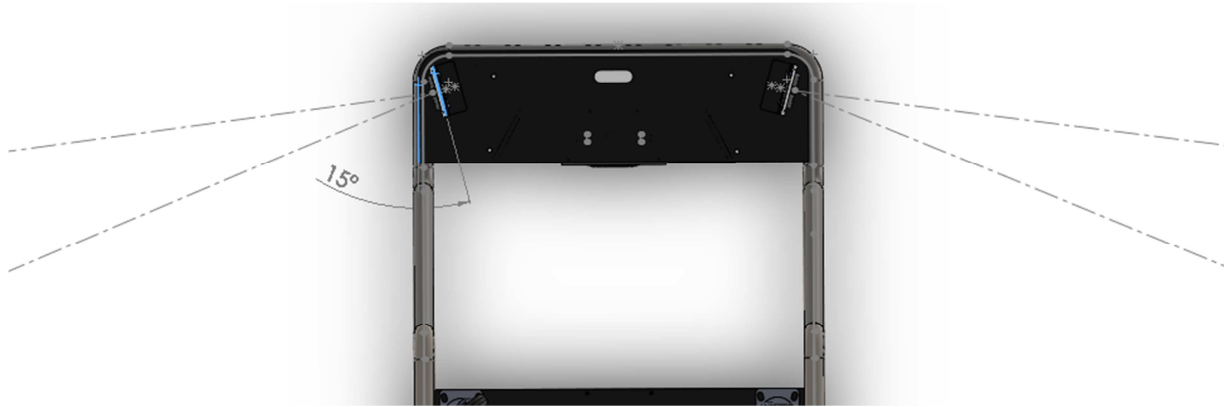


Figura 3.62 Desviación sensores traseros.

FUENTE: Elaboración propia

En este caso se programan los sensores para reconocer un objeto a una distancia máxima de 30cm. Si el sensor reconoce un objeto a una distancia menor a esta nos permitirá saber que hay peligro de colisión. Al parecer la distancia de 30cm es alta, sin embargo esto tiene que ver con la velocidad de giro y la velocidad de detección de los sensores. Realizando pruebas se notó que con esta distancia al momento del giro el RAD4-23 se acerca a una distancia de 10cm antes de detectar una colisión durante un giro.

3.5.3.2 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema de detección consta de:

- Soporte para los sensores delanteros.
- Estructura de los sensores delanteros.
- Estructura de los sensores traseros.

3.5.3.2.1 Soporte para los sensores delanteros

Se diseñó un soporte de acrílico para ubicar los sensores ultrasónicos delanteros a una altura mayor a 200mm desde el piso, para que su funcionamiento sea óptimo. El soporte se diseñó para que se acople a los motores para tener más estabilidad, el soporte se fija a los motores por medio de cuatro pernos M3, como se muestra en la Figura 3.63.

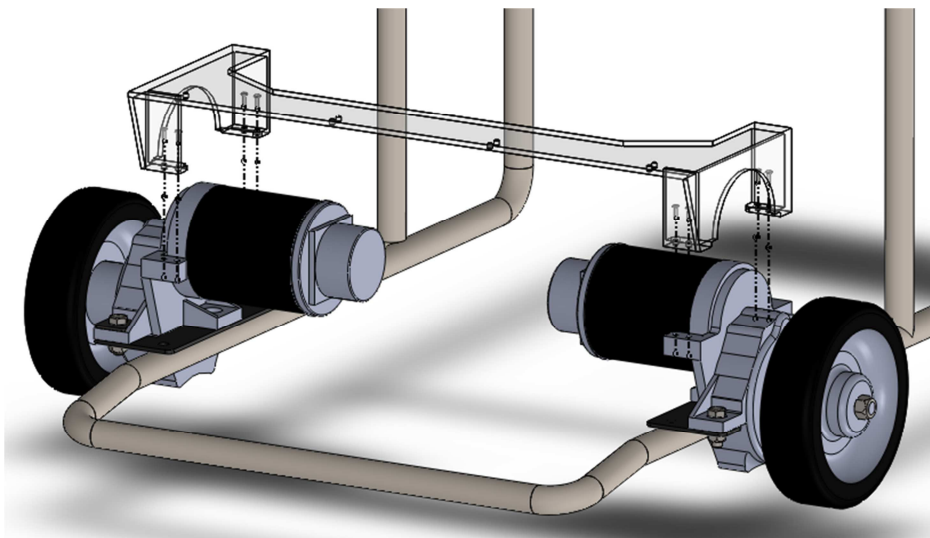
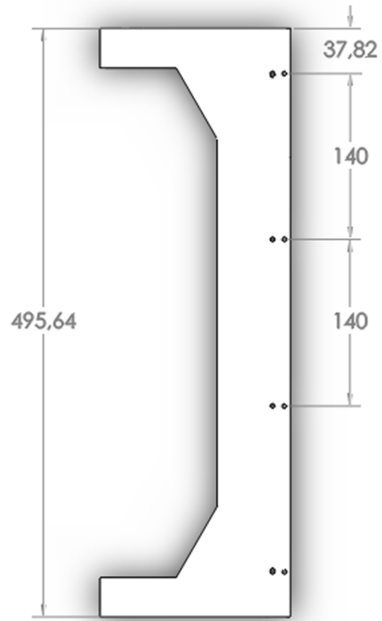


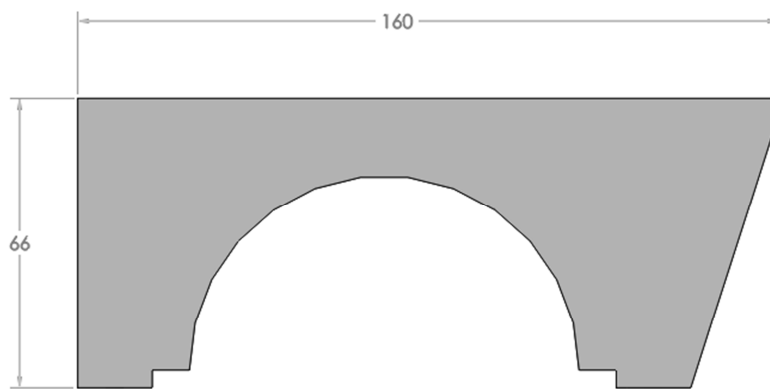
Figura 3.63 Vista explosionada del acople de la estructura para los sensores delanteros con los motores.

FUENTE: Elaboración propia.

Para que el soporte de los sensores pueda acoplarse a los motores necesita tener las medidas indicadas para este propósito. El soporte tiene 500mm de largo, 160mm de ancho y 66mm de alto, medidas mostradas en la Figura 3.64, además en la parte superior del soporte se realizará el montaje de los sensores ultrasónicos a través de pernos por lo que se necesita realizar agujeros M3 a distancias predeterminadas en el capítulo 3.5.3.1.1.2, también mostradas en la Figura 3.64(a).



(a)



(b)

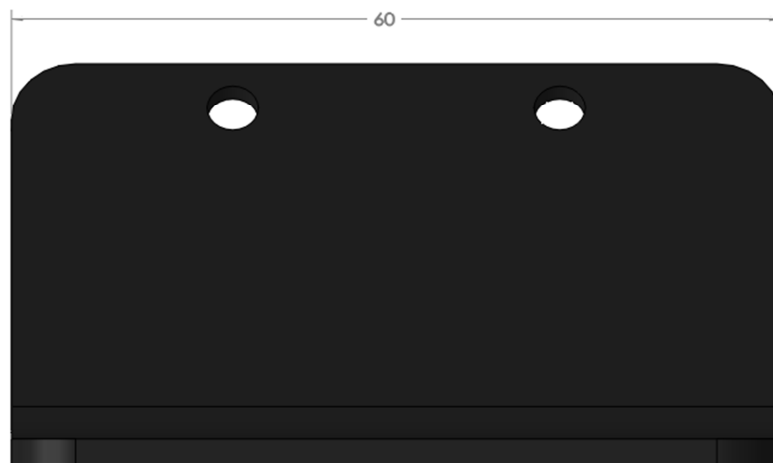
Figura 3.64 Medidas del soporte para los sensores delanteros. (a) Vista superior. (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

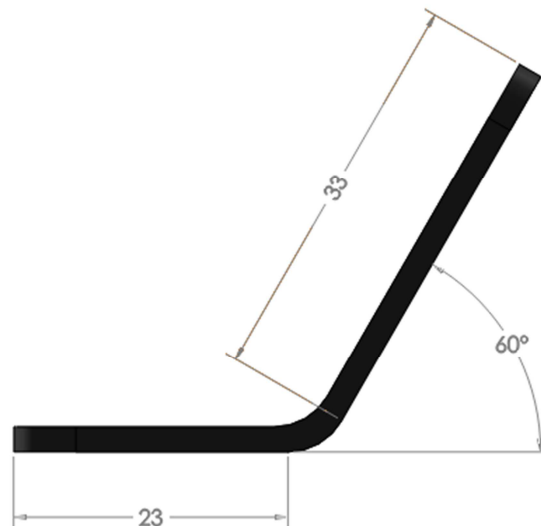
3.5.3.2.2 Estructura de los sensores delanteros

Para poder realizar el acople de los sensores ultrasónicos delanteros a su soporte se tuvo que realizar dos piezas diferentes:

- Acople angular de hierro de 1.5mm. Figura 3.65 Acople angular de hierro de 1.5mm. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.
- Acople de acrílico. Figura 3.66 Acople de acrílico.



(a)



(b)

Figura 3.65 Acople angular de hierro de 1.5mm. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

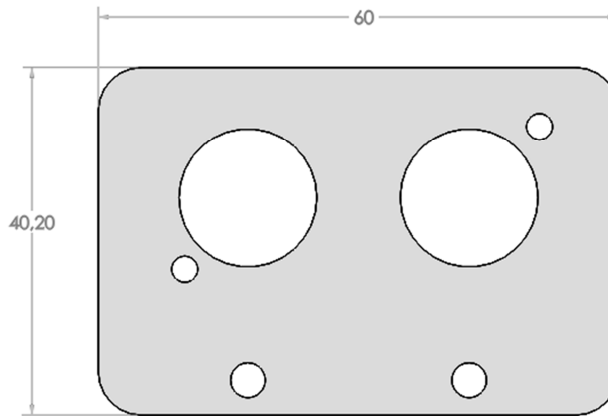


Figura 3.66 Acople de acrílico.

FUENTE: Elaboración propia.

El acople angular de hierro es el que estará fijado con pernos M3 a la estructura de soporte, este es el que nos permitirá darle el ángulo de 60° hacia el piso como se menciona en el capítulo 3.5.3.1.1.2, para que los sensores detecten objetos en el piso. El material de hierro nos da tanto seguridad como flexibilidad en el caso de realizar regulaciones del ángulo de inclinación. El acople de acrílico se lo realizó de este material para evitar cualquier tipo de cortocircuito ya que este va a estar en contacto con la circuitería del sensor ultrasónico. El sensor será acoplado a la pieza de acrílico con dos pernos M2 y a su vez esta pieza será fijada con dos pernos M3 al acople angular de hierro, como se muestra en la Figura 3.67.

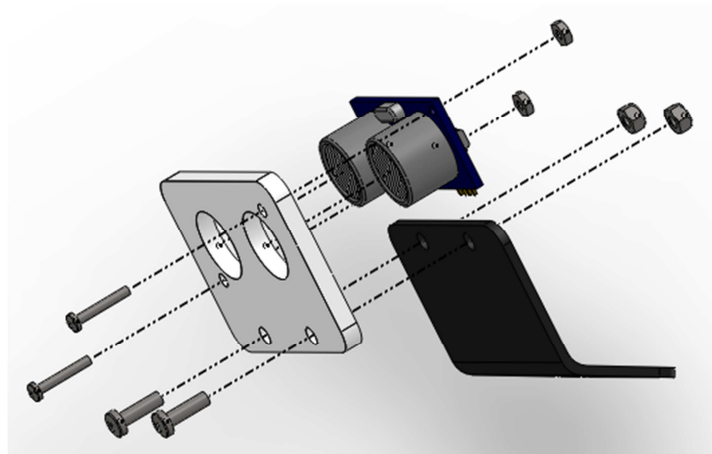


Figura 3.67 Vista explosionada del montaje de los sensores delanteros.

FUENTE: Elaboración propia.

Cada estructura de los sensores delanteros se fija al soporte de los sensores con dos pernos M3, como se muestra en la Figura 3.68.

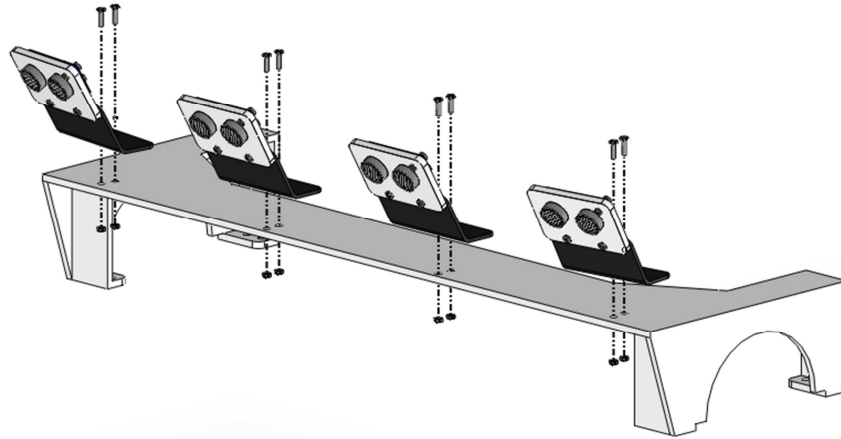


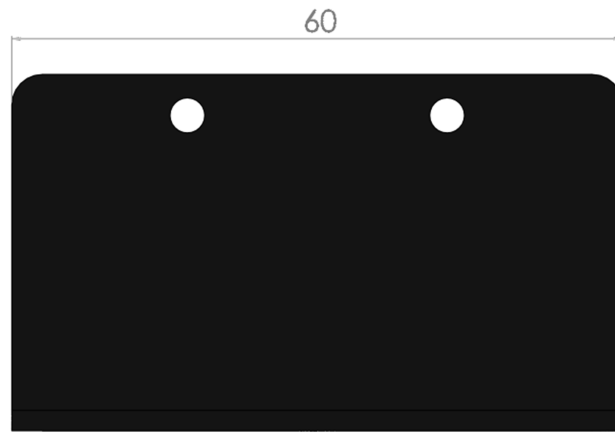
Figura 3.68 Vista explosionada del montaje de la estructura de los sensores delanteros.

FUENTE: Elaboración propia.

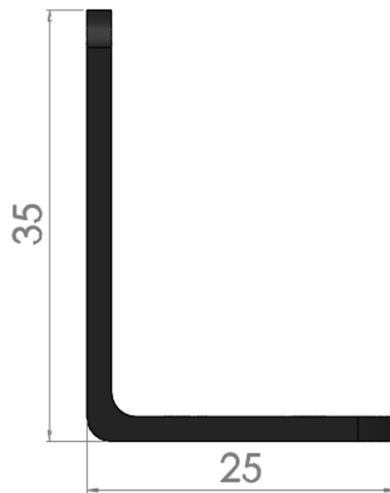
3.5.3.2.3 Estructura para los sensores traseros

Para poder realizar el acople de los sensores ultrasónicos traseros a la plancha de soporte para el Kinect se utilizó piezas parecidas a las de los sensores delanteros con la diferencia de que el acople angular está a 90 grados.

- Acople angular de hierro de 1.5mm. Figura 3.69
- Acople de acrílico. (Mismo que en los sensores delanteros. Figura 3.66)



(a)



(b)

Figura 3.69 Acople angular de hierro de 1.5mm. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

El montaje es igual al explicado en los sensores delanteros, de manera que en mostramos solamente la vista explosionada del montaje en la Figura 3.70.

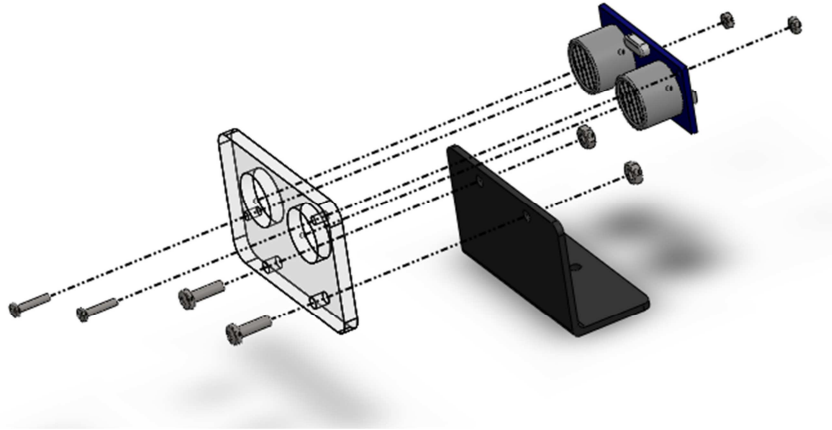


Figura 3.70 Vista explosionada del montaje de los sensores traseros.

FUENTE: Elaboración propia.

Estos acoples se unen a través de pernos M3 en la ubicación que se mostró en la Figura 3.62.

3.5.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Como se trató en el capítulo 3.4.4 el sistema de alimentación tiene como elemento principal la batería, sin embargo se realiza al final el dimensionamiento de la misma para conocer primeramente el consumo de corriente total.

3.5.4.1 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico del sistema de detección está conformado por el dimensionamiento o diseño de los siguientes elementos:

- Fuentes.
 - Fuente para motores.
 - Fuente para computador.
 - Fuente para microcontrolador.
 - Fuente para altavoz.

- Fuente para Kinect.
- Fuente para sensores.
- Batería.
- Cargador de batería.

3.5.4.1.1 Fuentes

Antes de elegir la capacidad de la batería que entregará la energía para todos los elementos, diseñamos las fuentes de los diferentes elementos, de manera que sepamos cuánto será el consumo total de corriente y con ese dato elegir la capacidad de batería adecuada. El voltaje máximo de todo el sistema es de 12V, el cual está dado por el voltaje de consumo de los motores. Así que las fuentes deberán utilizar este voltaje máximo para obtener el voltaje adecuado a la salida.

3.5.4.1.1.1 Fuente para los motores

Los motores estarán conectados directamente al puente H a utilizar, de manera que el puente H a elegir será el que deba tener la capacidad de soportar el voltaje y corriente de cada uno de los motores. Por lo tanto este deberá tener las características de voltaje y corriente de acorde a lo tratado en el capítulo 3.5.1.1.1.1, las cuales son un voltaje de 12V y una corriente de 3A por cada motor. Estos datos nos ayudan además en el dimensionamiento de la batería.

Debido a que nuestro elemento principal es el motor, buscamos que los elementos a seleccionar tengan un voltaje máximo que el necesario para alimentar los motores. Entonces el voltaje de la batería sería de 12V y a partir de este voltaje se diseñan las fuentes del resto de elementos.

Las protecciones que se buscan para los motores son:

- Sobre voltaje
- Sobre corriente

- Cortocircuito

Estas protecciones las obtenemos del puente H del cual se trata en el capítulo 3.5.1.2.1.1, donde se explica la circuitería y las protecciones que este ofrece. Adicionamos a estas protecciones un fusible de 12A, conectado en el cable de la polarización positiva de la batería. Este fusible es la protección general para el RAD4-23.

3.5.4.1.1.2 Fuente para el Kinect

Las características de corriente y voltaje se las trataron en el capítulo 3.5.2.1.1. El valor de voltaje es de 12V y el consumo de corriente es de 1.08A. Es importante tomar en cuenta que una batería completamente cargada no entrega un valor exacto de 12V, y este puede llegar a un valor entre 13V y 14V. Este voltaje podría causar un daño en el dispositivo, de manera que para la fuente del mismo será necesario regular el voltaje de entrada, el cual es el voltaje entregado por la batería, para obtener los 12V que utilizará el Kinect.

Para regular este voltaje se conoce dos opciones:

- Regulador de voltaje LM7812.
- Convertidor DC-DC LM2596S².

En la Tabla 3.10 se hace una comparación de las características entre los dos dispositivos:

Tabla 3.10 Comparación entre LM7812 y LM2596S.

Característica/Dispositivo	LM7812	LM2596S
Eficiencia	Baja	Alta
Disipación de calor	Alta	Baja
Seguridad	Baja	Alta

² <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>

Corriente máxima	Depende del modelo	3A
------------------	--------------------	----

FUENTE: Elaboración Propia.

En un robot móvil, es necesario que la eficiencia sea alta, caso contrario el consumo de la batería provocaría una autonomía reducida. Además se busca una disipación de calor lo más baja posible. Las ventajas de un convertidor DC-DC sobre un regulador de voltaje convencional son muy grandes, de manera que esta es la alternativa óptima para este proyecto.

Este convertidor DC-DC es un regulador reductor, al igual que el LM7812, sin embargo existe un problema que nace del uso del convertidor DC-DC. Al igual que cuando la batería se encuentra completamente cargada entrega voltajes superiores a las 12V, al descargarse este entrega voltajes menores a los 12V lo cual supone un problema en la alimentación del Kinect.

Al realizar pruebas con el Kinect cuando la batería se encontraba en este rango de voltaje menor a 12V, se pudo comprobar que el Kinect tiene problemas para trabajar normalmente. Además el LM2596S tiene un inconveniente respecto a la regulación, el voltaje regulado a la salida debe tener una diferencia de al menos 2V respecto a la entrada, caso contrario este se vuelve inestable. Esto complicaría la regulación debido a que el Kinect dejaría de funcionar antes de que la batería se agote completamente.

Como solución se optó por realizar dos etapas de regulación. Una etapa reductora a 7V y una elevadora a 12V. Para la etapa de elevación se utilizó el convertidor DC-DC LM2577³, el cual tiene características de entrada y salida parecidas a las del LM2576S. El Circuito de la fuente del Kinect obtenido se indica en la Figura 3.71.

³ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2577.pdf>

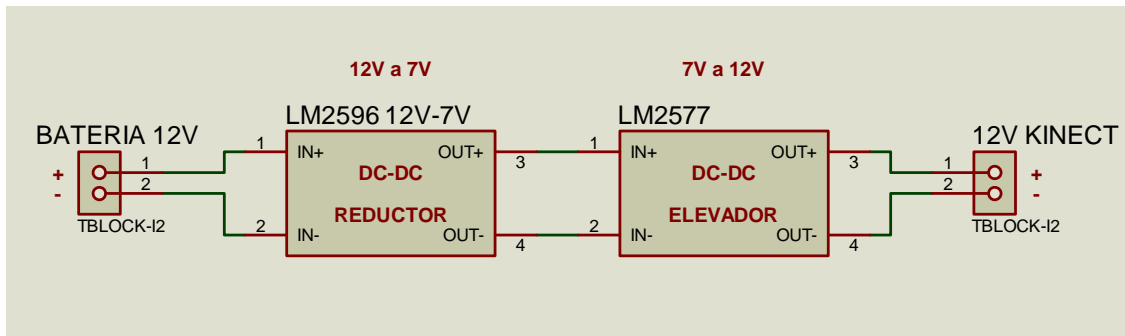


Figura 3.71 Circuito Fuente Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

Las protecciones de sobre voltaje las ofrece el mismo convertidor DC-DC al ofrecernos una salida estable aunque el voltaje se eleve en su entrada. El ruido que puede llegar a generar la fuente es filtrado en el cable de conexión del Kinect. Este cable posee ferritas en sus dos extremos para filtrar voltajes parasitarios.

3.5.4.1.1.3 Fuente para el computador

El computador a utilizar es un Apple Mac Mini, del cual se explica su selección en el capítulo 3.5.2.1.2.3. Este computador tiene una entrada de voltaje de 110V-240V en corriente alterna. Sin embargo se tiene una solución para utilizar este computador conectado a la batería de 12V.

Este computador ha llegado a ser utilizado en los automóviles con diferentes propósitos, como reproducir videos o audio, debido a su pequeño tamaño y grandes prestaciones. Por esta razón se han desarrollado métodos para conectar este computador a los terminales de voltaje que ofrecen los automóviles. Para ello se utilizan dos dispositivos, un cable de conexión especial y un regulador de voltaje. Estos mismos elementos serán utilizados para la fuente del computador. En la Figura 3.72 se muestra el “Mac Pac Power Kit” donde encontramos este cable para conexión directa al regulador P1900 mostrado en la Figura 3.73. Este regulador lo podemos conectar directamente a la batería de 12V, el mismo que nos ofrece las protecciones de sobre voltaje y sobre corriente.

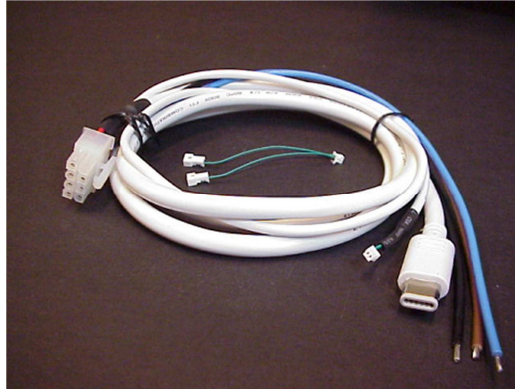


Figura 3.72 Mac Pac Power Kit.

FUENTE: Carnetix (2013). Productos. Recuperado de: http://carnetix.com/optional_cables.htm.

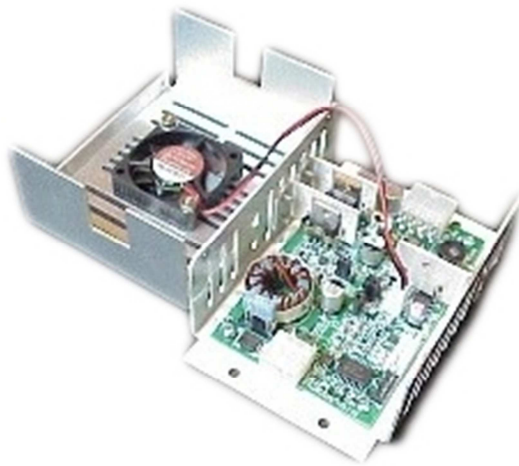


Figura 3.73 Car-Netix CNX-P1900.

FUENTE: Carnetix (2013). Productos. Recuperado de:
http://store.mp3car.com/Carnetix_CNX_P1900_DC_DC_Regulator_p/pwr-010.htm

El consumo de potencia por parte del Mac Mini es de 11W cuando no está realizando ningún trabajo y de 40W trabajando realizando operaciones de consumo moderado. El utilizar las funciones del sensor Kinect se considera una operación de consumo moderado, de manera que la corriente de consumo del Mac mini sería de:

—

La corriente de consumo del regulador es de 200mA, de manera que obtenemos un total aproximado de 3.5A. El computador además es el que entrega la energía al microcontrolador y al altavoz, los cuales se tratan a continuación.

3.5.4.1.1.3.1 Fuente para el microcontrolador

El microcontrolador a usar es una placa Arduino Mega 2560 R3, el cual se trata en el capítulo 3.5.2.1.3. Esta placa está diseñada para obtener la energía a través del puerto USB con el que se va a realizar la comunicación serial con el computador. Por esta razón no es necesario realizar un diseño de esta fuente. Esta placa también tiene las protecciones necesarias para ruido a través de su propia red de capacitores. Como protección para sobre corriente y cortocircuitos tiene un fusible restaurable de 200mA.

3.5.4.1.1.3.2 Fuente para el altavoz

Al igual que el microcontrolador, las características de este altavoz, el cual se trata en el capítulo 3.5.2.1.2.4, nos permiten alimentarlo desde el puerto USB de manera que no es necesario realizar el diseño de una fuente adicional para este elemento.

3.5.4.1.1.4 Fuente para sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos utilizados en el RAD4-23 funcionan a un voltaje de 5V y cada uno consume una corriente de 30mA, de manera que tenemos un total de:

$$I_s = 30mA \times 6$$

$$I_s = 180mA$$

En este caso necesitaremos regular desde los 12V a los 5V. Como se explicó anteriormente, es conveniente usar un conversor DC-DC. Para la alimentación de estos sensores utilizamos el mismo LM2596S y ajustamos su salida a los 5V. Además agregamos una red de capacitores, conectados a cada borne donde se conectarán los pines de alimentación de cada sensor, para filtrar voltajes parasitarios. En este circuito también cortocircuitamos la tierra del microcontrolador con la de la fuente de los sensores, ya que deben tener la misma referencia que el microcontrolador.

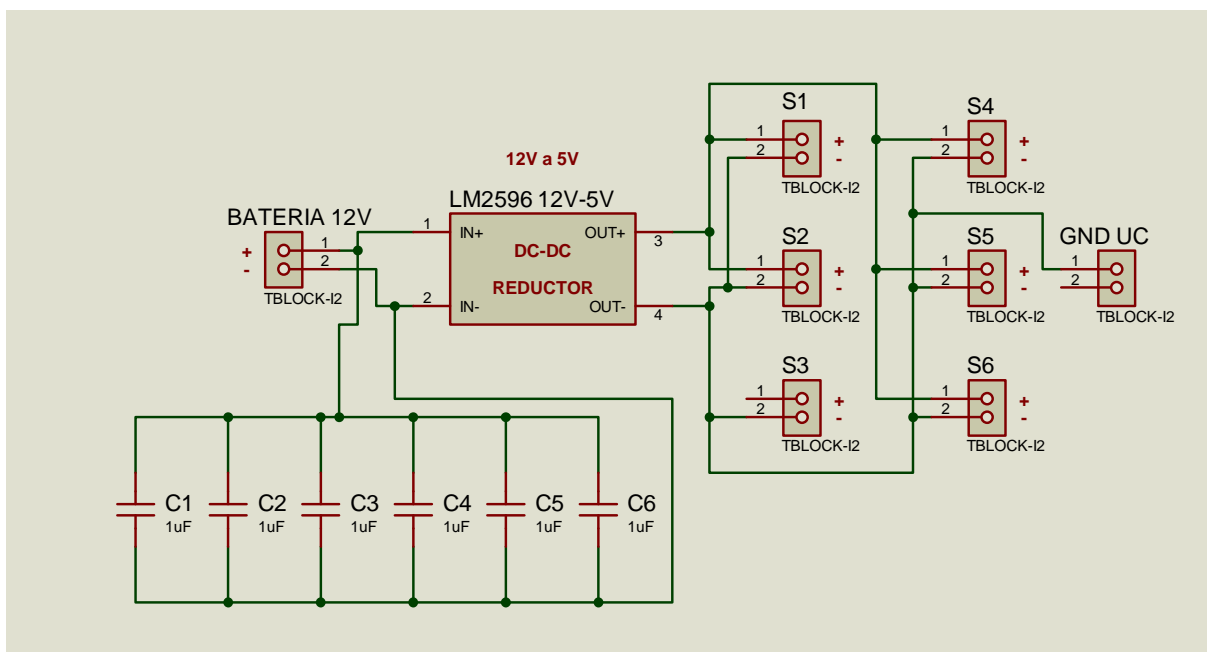


Figura 3.74 Circuito fuente para sensores.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.4.1.2 Batería

En este capítulo se realiza la selección de la batería que suplirá de energía a todos los elementos eléctricos y electrónicos a excepción del microcontrolador y altavoz que serán alimentados a través del puerto USB del computador. Para ello es necesario analizar el consumo de corriente de todos los elementos y tomar en cuenta la autonomía que se desea tener.

Para encontrar la batería correcta se necesitan dos datos, el voltaje nominal de alimentación y también la capacidad que se requiere de la misma. Como se explicó en el capítulo 3.5.1.1.1.1, la batería tendrá un voltaje de 12V. La capacidad de la batería se calcula a partir del consumo de corriente total. Los consumos de corriente que tenemos son:

- Motores: 6A.
- Computador: 3.5A.
- Kinect: 1A.
- Sensores: 180mA.

Se espera que el consumo de corriente sea entonces de:

$$I_T = 6A + 3.5A + 1A + 0.18A$$

$$I_T = 6A + 3.5A + 1A + 0.18A$$

$$I_T = 10.68A$$

La corriente de consumo total es aproximadamente 12.68A. Para obtener la capacidad realizamos el siguiente cálculo con la aplicación de la fórmula y exponente de Peukert⁴.

$$t = \frac{H}{\left(\frac{I \times H}{C}\right)^k}$$

Donde:

- t: Tiempo en horas de autonomía.
- H: Base de tiempo indicado por el fabricante, en este caso 20H.
- I: Intensidad de corriente solicitada a la batería en amperios.
- C: Capacidad de la batería en amperios hora.
- k: Coeficiente de Peukert, valor inherente al tipo de batería, en este caso 1.3 para una batería de gel.

⁴ http://batteryuniversity.com/learn/article/calculating_the_battery_runtime

La autonomía que se espera es mínimo de 1.5 horas, remplazando entonces tenemos:

$$1.5H = \frac{20H}{\left(\frac{10.68A \times 20H}{C}\right)^{1.3}}$$

$$C = 29.12Ah$$

Además de la capacidad, es necesario que cumpla con otras características, las cuales se muestran a continuación:

- Batería sellada por seguridad.
- Precio accesible.

En la Tabla 3.11 se muestra una comparación entre las opciones de baterías que cumplan con las necesidades del RAD4-23.

Tabla 3.11 Comparación entre opciones de batería.

Tipo de batería	Peso	Disponibilidad Selladas	Descarga profunda	Precio
Plomo ácido	Alto	Sí	No	Bajo
Gel	Alto	Sí	Sí	Medio
Litio	Bajo	Sí	Sí	Alto

FUENTE: Elaboración propia.

Como condiciones más importantes se establecen el precio y la capacidad de tener descarga profunda, debido a que las baterías se podrán descargar hasta el final al ser un robot. Por esta razón la mejor opción es la batería de gel.

Se encontró una batería con las características ya indicadas pero con una capacidad mínima de 33Ah, la cual es superior a lo calculado, entregándonos así

una autonomía mayor a 1.5 horas. La batería seleccionada es una MARS2000 de modelo MR33-12, mostrada en la Figura 3.75.



Figura 3.75 Batería MARS2000 MR33-12 sellada de 12V33Ah para los motores.

FUENTE: Elaboración propia.

Tal como se describió en el capítulo 3.5.1.1.1.1, se cambió la fuente de 24V la cual era nominal del motor a una de 12V para reducir su velocidad, una vez elegida la batería se realizaron pruebas de velocidad con el RAD4-23. Estas pruebas se hicieron en una recta de 10 metros y se cronometró el tiempo que el robot demoró en recorrer los 10 metros. El robot fue cargado con una masa similar a la de todos los elementos y se obtuvo un tiempo de 17.2 segundos. De manera que la velocidad del RAD4-23 sería aproximadamente de 0.58m/s, lo cual cumple con la especificación buscada. La elección final es entonces una batería de gel de 12V33Ah.

3.5.4.1.2.1 Cargador de batería

Debido a que la batería del RAD4-23 está en constante descarga, se aumenta en el diseño un cargador de baterías el cual va a cargar la batería del RAD4-23 cada vez que se necesite sin necesidad de retirar la batería de su posición de trabajo.

3.5.4.1.2.1.1 Requerimientos del cargador

Se necesita un cargador de baterías de 12V a 33Ah, un tiempo no mayor a 8 horas de carga para poder realizar la carga de la batería en las noches. Es fundamental que el cargador de baterías tenga las debidas protecciones, como polaridad cambiada, seguro contra cortocircuitos, circuitos abiertos, sobre calentamiento, sobre corriente y sobre carga.

Tomando en cuenta los diferentes requerimientos para la elección del cargador de baterías, se escogió al cargador inteligente “G3500 NOCO genius” (Figura 3.76) el cual dispone de:

- Compatibilidad para baterías de 6V y 12V.
- Compensación de voltaje de entrada para una recarga del 100%.
- Apagado automático después de un periodo extendido de tiempo de haber llegado a la carga completa.
- Seguridades de polaridad cambiada, cortocircuito, circuito abierto, prueba de chispa, sobre voltaje, sobre corriente, sobre carga.
- Modo de recuperación de baterías, para cargar baterías profundamente descaradas o sulfatadas con carga a pulsos.
- Compatible con múltiples baterías como, gel, de plomo ácido, para baterías sin mantenimiento y para baterías AGM.



Figura 3.76 Cargador inteligente “G3500 NOCO genius”

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.4.1.2.1.2 Tiempos de carga

Según especificaciones técnicas del G3500 el tiempo de carga para baterías normalmente descargadas se muestra en la Tabla 3.12, tomando en cuenta que si la batería está profundamente descargada o sulfatada, la carga durará más tiempo.

Tabla 3.12 Tiempos de carga.

Tamaño de Batería (Ah)	Tiempo aproximado de carga en horas.			
	6V	12V	6V pequeña	12V pequeña
1.2	-	-	1.0	1.0
2.2	-	-	1.5	1.5
7.2	-	-	4.5	4.5
14	2.5	2.5	9.0	9.0
25	4.5	4.5	-	-
30	5.0	5.0	-	-
40	7.0	7.0	-	-

50	9.0	9.0	-	-
60	10.0	10.0	-	-
100	17.5	17.5	-	-
120	21.0	21.0	-	-

FUENTE: Elaboración propia.

Realizando el análisis pertinente tenemos que como la batería del RAD4-23 es de 12V a 33Ah, en el caso de que la batería esté normalmente descargada se demorará entre 5 a 7 horas, por lo que se cumple el requisito de máximo 8 horas de carga.

3.5.4.1.2.1.3 Conexión del cargador

Para la conexión del cargador se debe tomar en cuenta que debe existir una conexión entre la parte interna del RAD4-23 y el cargador que estará ubicado afuera. El cargador debe estar ubicado fuera del RAD4-23 por que debe estar alejado de la batería por seguridad.

El cargador viene con dos cables, el uno se conecta a cualquier fuente de 110VAC y el otro es el conector GC004. Se utiliza el conector GC004, el cual se enchufará con el conector con LEDs indicadores GC016, este conector estará empotrado en la carcasa del RAD4-23 y conectado a la batería, como se muestra en la Figura 3.77

Figura 3.77 Conexión cargador.

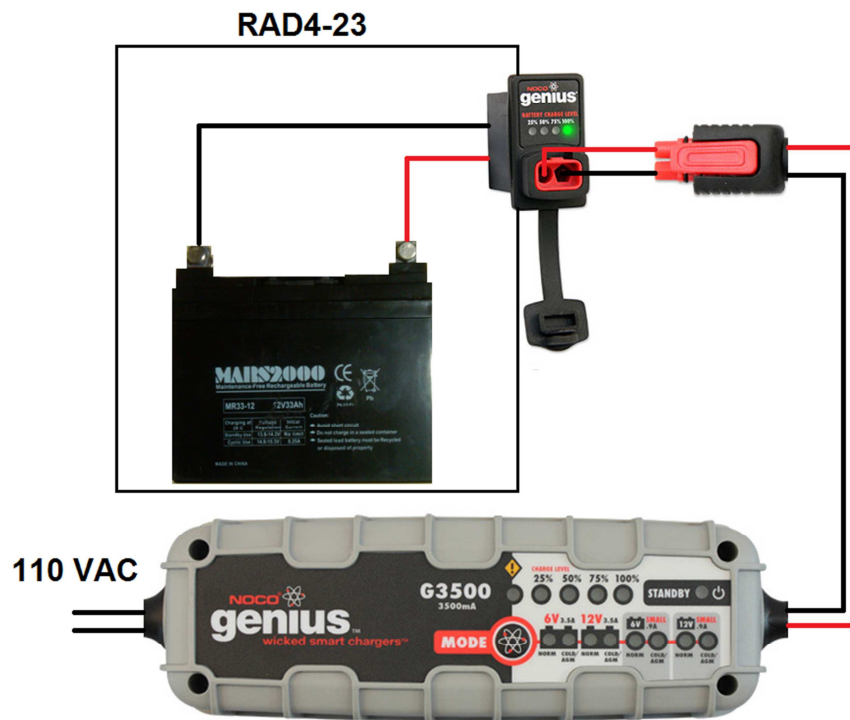


Figura 3.77 Conexión cargador.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.4.2 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema de alimentación como se muestra en el capítulo 3.4.4.2 consta solamente de la placa electrónica para conexión de elementos.

3.5.4.2.1 Placa electrónica para conexión de elementos

Una vez diseñadas las fuentes y protecciones como se indica en el 3.5.4.1 y seleccionados los elementos electrónicos a utilizar, se nota la necesidad de una placa electrónica para la ubicación de los elementos para fuente de alimentación y las conexiones entre los dispositivos electrónicos.

Básicamente el diseño de esta placa electrónica está basado en los mismos circuitos del capítulo 3.5.4.1 unidos todos en un solo circuito. Se agrega un potenciómetro conectado en paralelo a la batería, el cual hace de un divisor de

voltaje. Este divisor de voltaje nos permite leer el cambio de voltaje de la batería en un rango de 0V hasta 5V, valor que soportan las entradas analógicas del microcontrolador. Este voltaje se lee constantemente a través de una entrada analógica del Arduino Mega para que una vez que el voltaje de la batería esté en un nivel mínimo para el funcionamiento del RAD4-23, se envíe una alerta al computador y este a su vez de conocimiento al usuario para que se realice la recarga de la batería. El circuito es muy simple y se muestra en la Figura 3.78.

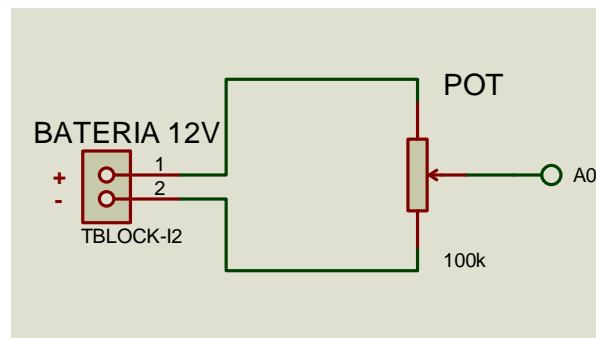


Figura 3.78 Divisor de voltaje para medición de nivel de carga en la batería.

FUENTE: Elaboración propia.

Es necesario también tener LEDs indicadores que nos permitan visualizar si las fuentes o los dispositivos están funcionando correctamente. Sin embargo ya existen estos indicadores en la mayoría de los dispositivos excepto en los sensores ultrasónicos. El puente H tiene LEDs que indican, conexión de batería y funcionamiento de motores. El sensor Kinect tiene su propio LED indicador que muestra que está conectado a una fuente de alimentación. El Arduino Mega tiene un LED indicador que muestra la conexión a una fuente de alimentación. Para los sensores ultrasónicos se agrega entonces un LED indicador en la placa electrónica que muestra que la fuente de alimentación de 5V está funcionando.

Teniendo en cuenta estos aditamentos y utilizando el software ARES Professional se realizó la ubicación de todos los componentes en la placa electrónica teniendo como resultado lo mostrado en la Figura 3.79. Donde los bloques celestes representan los componentes electrónicos, las pistas azules las pistas ubicadas en la capa inferior y las líneas rojas las pistas ubicadas en la capa

superior. Además se colocó un plano de tierra. Las medidas de la placa obtenida son de 182mm x 84mm.

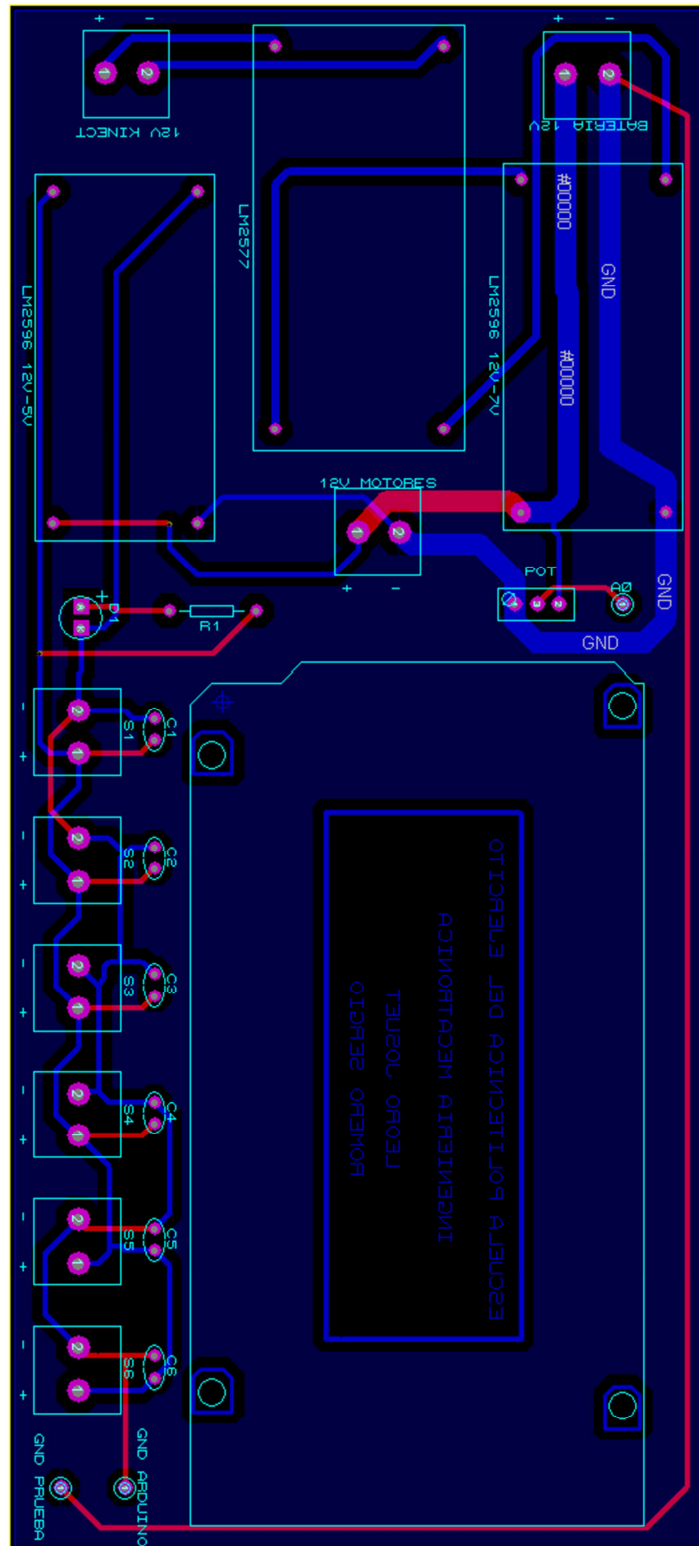


Figura 3.79 Placa electrónica para ubicación de componentes electrónicos.

FUENTE: Elaboración propia.

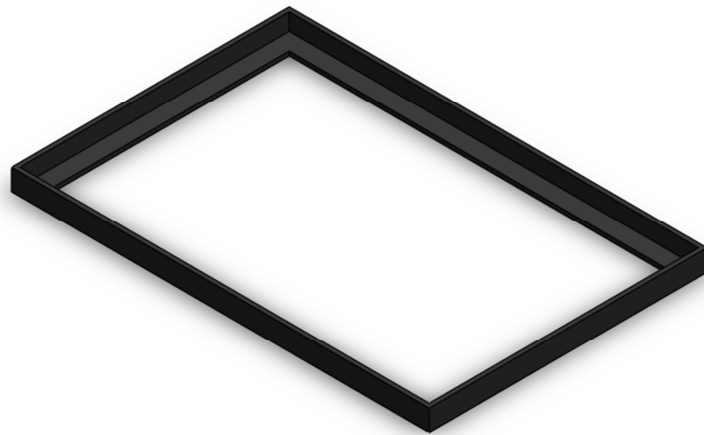
3.5.4.3 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema de alimentación consta de:

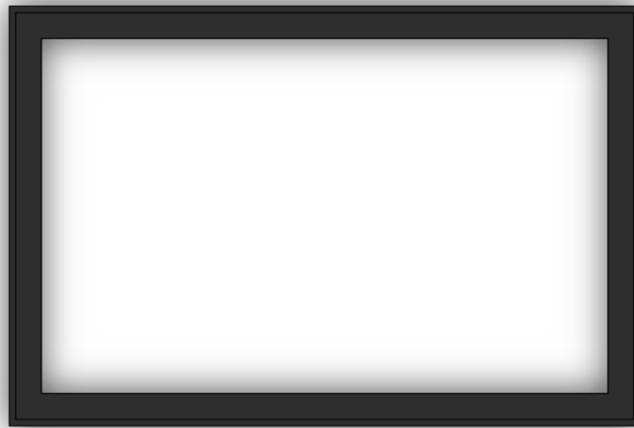
- Fijación de batería.
- Sujeción del regulador de voltaje para el computador.
- Sujeción de la placa electrónica.

3.5.4.3.1 Fijación de batería

Se diseña un asiento para la batería, de manera que esta se mantenga inmóvil respecto al RAD4-23. Este asiento lo realizamos por facilidad con ángulos de hierro siguiendo la forma y dimensiones de la batería, el cual se muestra en la Figura 3.80.



(a)



(b)

Figura 3.80 Asiento para la batería. (a) Vista isométrica. (b) Vista superior.

FUENTE: Elaboración propia

Adicional a este asiento se le coloca una correa de sujeción a la batería, el conjunto completo se muestra en la Figura 3.81. El método de unión entre la plancha de soporte para la batería y este asiento es a través de soldadura.

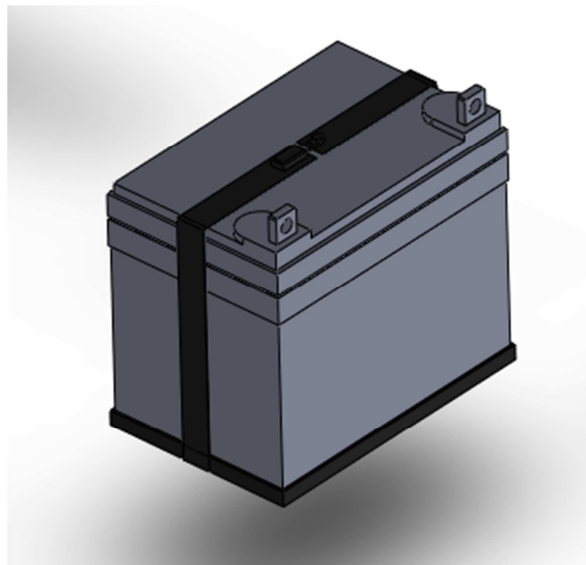


Figura 3.81 Conjunto para sujeción de la batería.

FUENTE: Elaboración propia

3.5.4.3.2 Sujeción del regulador de voltaje para el computador

Como se trató en el capítulo 3.5.4.1.1.3 para protección eléctrica del computador se utiliza un regulador de voltaje. Este se lo ubicará sobre la plancha de soporte para la batería a distancias mostradas en la Figura 3.82 desde una vista superior. Este regulador tiene agujeros en ubicados en las esquinas de su placa inferior que nos permiten utilizar pernos M3 para sujetarlo.

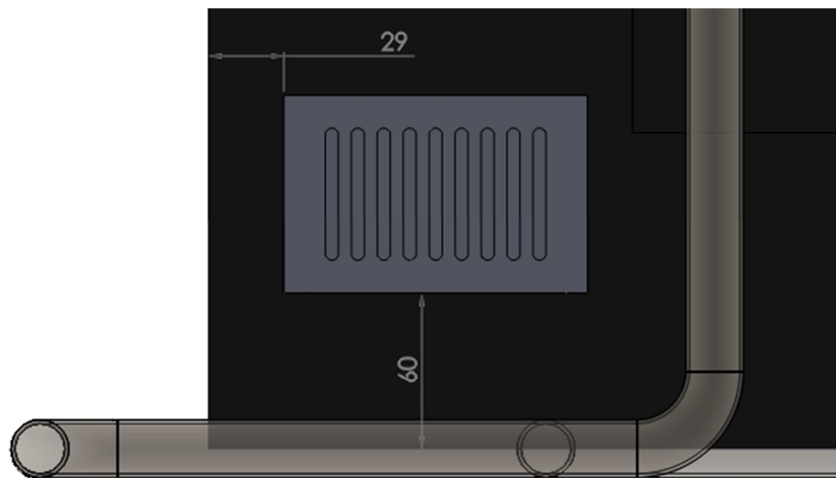


Figura 3.82 Ubicación del regulador de voltaje para el computador.

FUENTE: Elaboración propia.

3.5.4.3.3 Sujeción de la placa electrónica

La placa electrónica se decidió ubicarla en la plancha de soporte a distancias mostradas en la Figura 3.83 desde una vista superior. La placa fue diseñada para ser sujeta a la plancha de soporte a través de cuatro pernos espaciadores, para que no se encuentre la parte inferior de la misma en contacto con la plancha y evitar así un cortocircuito.

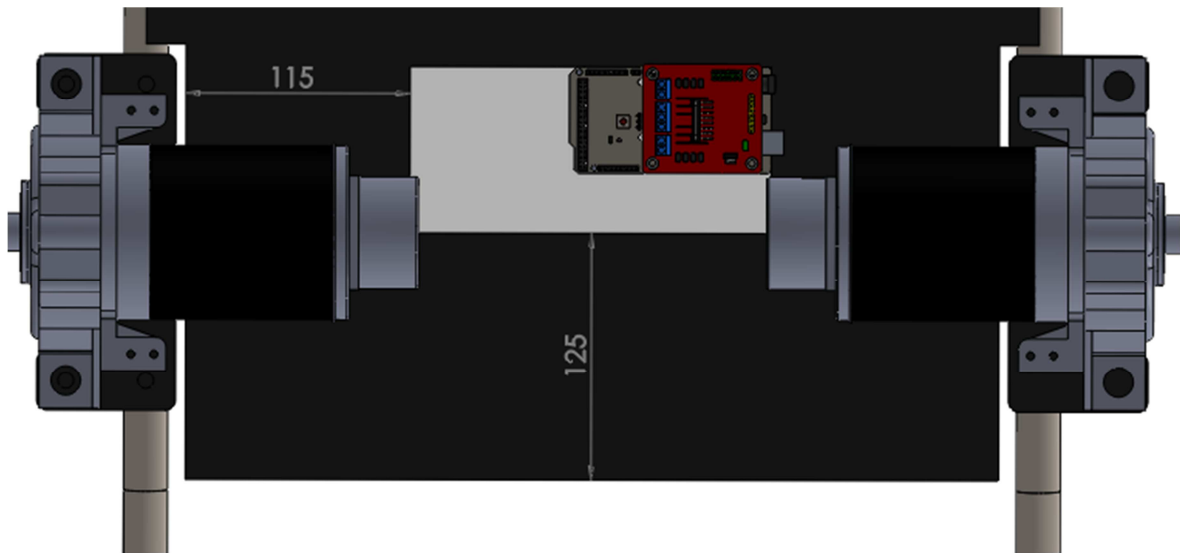


Figura 3.83 Ubicación de la placa electrónica para conexión de componentes sobre la plancha de soporte para la batería.

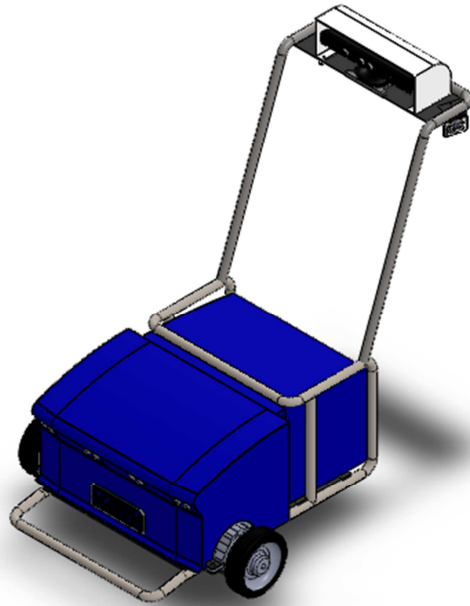
FUENTE: Elaboración propia.

3.6 RESULTADO

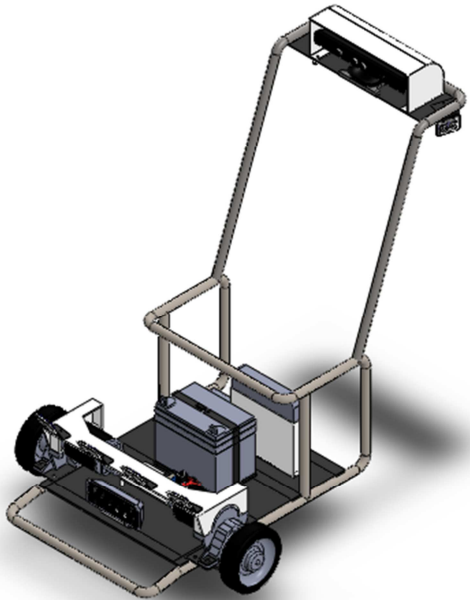
En este capítulo se muestra el resultado final del diseño del RAD4-23 y sus especificaciones eléctricas y mecánicas finales. Los planos de todos los elementos mecánicos y su montaje se muestran en el Anexo A.

3.6.1 CAD del RAD4-23

El resultado obtenido del diseño CAD es el mostrado en la Figura 3.84, tomando en cuenta que la canastilla no es parte de nuestro diseño. En esta figura vemos todos los elementos colocados en sus respectivas posiciones. En la Figura 3.85 vemos el RAD4-23 con una canastilla modelo.



(a)



(b)

Figura 3.84 CAD del RAD4-23. (a) Con la carcasa. (b) Sin la carcasa.

FUENTE: Elaboración propia.

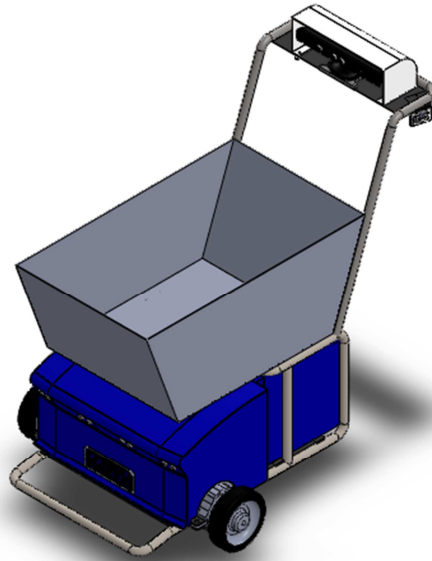


Figura 3.85 CAD del RAD4-23 con canastilla modelo.

FUENTE: Elaboración propia,

En la Figura 3.86 tenemos una vista superior de la parte inferior del RAD4-23 donde se nota la ubicación de todos los elementos sobre la plancha de soporte de la batería.

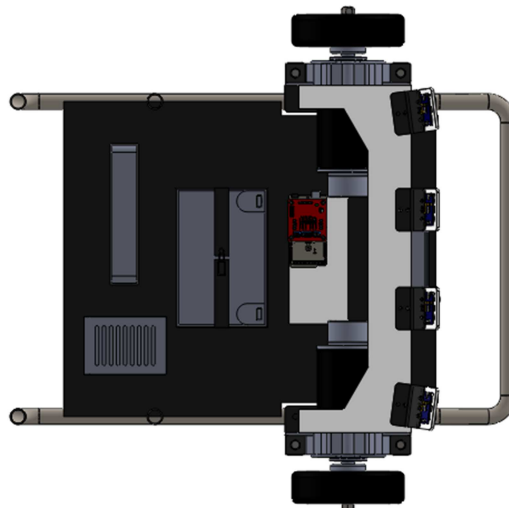
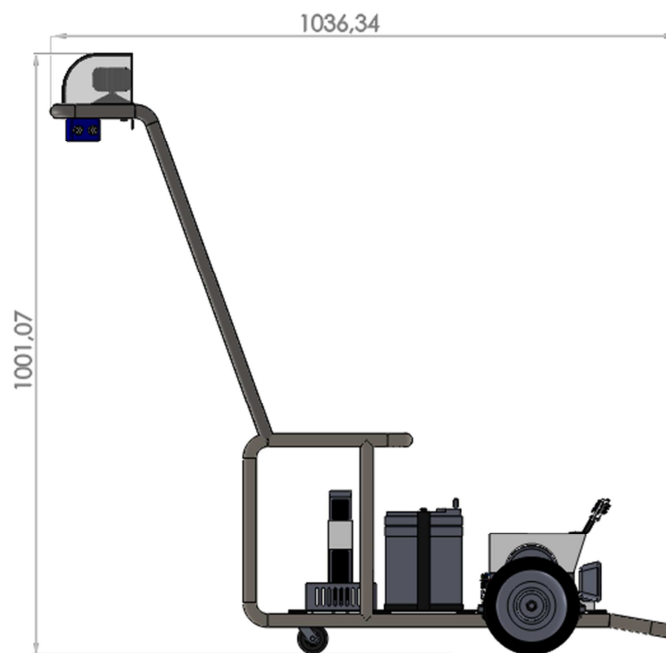


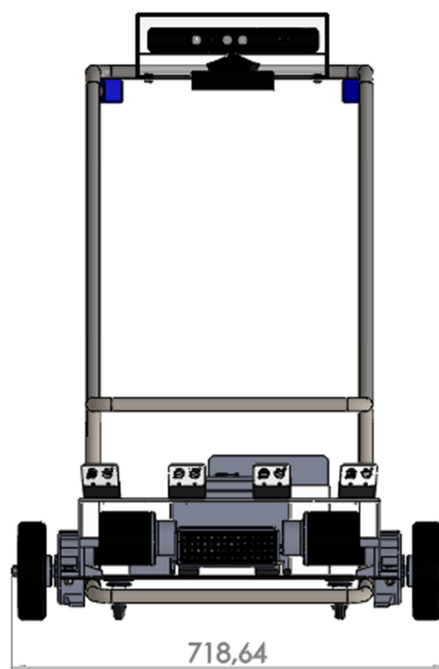
Figura 3.86 Plancha inferior con todos los elementos del RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia.

Las dimensiones del RAD4-23 se muestran en la Figura 3.87.



(a)



(b)

Figura 3.87 Dimensiones del RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia.

3.6.2 Especificaciones técnicas

Las especificaciones mecánicas y eléctricas obtenidas del diseño del RAD4-23 se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Especificaciones técnicas del RAD4-23.

Característica	Valor
Dimensiones	1m x 1.4m x 0.72m
Peso	41 Kg
Velocidad	0.67 m/s
Voltaje	12VDC
Corriente	10.7A
Autonomía	1.75 horas

FUENTE: Elaboración propia.

CAPITULO 4

SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

El objetivo principal del RAD4-23 es seguir al usuario mientras este realiza compras en un supermercado. Para lograr este cometido se decide usar un dispositivo de adquisición de imágenes y algoritmos de visión artificial para obtener la posición del usuario. Esta posición es evaluada para tomar las acciones necesarias y realizar el movimiento del robot utilizando los motores.

Además de la posición es necesario tener una cierta precisión lo cual nos brinda confiabilidad en la distancia entre el RAD4-23 y el usuario. Esto nos permite evitar que el robot se acerque demasiado al usuario o que colisione con el mismo. La representación de este sistema de visión artificial como una caja negra se muestra en la Figura 4.1.

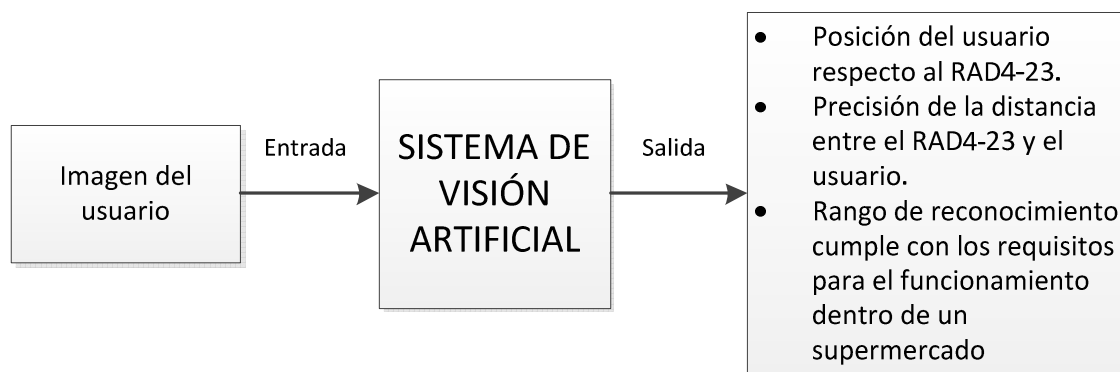


Figura 4.1 Representación del sistema de visión artificial como caja negra.

FUENTE: Elaboración propia.

Para cumplir con estos requerimientos se utiliza el sensor Microsoft Kinect (Microsoft Kinect para Windows SDK V1.5.2, 2012)¹⁵ para Windows, en el cual será necesario hacer una serie de pruebas para evaluar los datos obtenidos por el mismo y validar su uso.

4.1 SENSOR MICROSOFT KINECT PARA WINDOWS

Este dispositivo creado originalmente para la consola Microsoft XBOX360, permite a los usuarios controlar e interactuar con la consola sin la necesidad de tener contacto físico con un controlador de videojuegos tradicional, mediante una interfaz natural de usuario que reconoce gestos, comandos de voz y objetos e imágenes. Para ello el dispositivo utiliza algoritmos de visión artificial creados por el equipo de investigación de Microsoft.



Figura 4.2 Sensor Kinect para Windows.

FUENTE: Kinect para Windows. Recuperado de: <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>, Inglés, 2013.

4.1.1 CARACTERÍSTICAS

El sensor Kinect para Windows está formado por:

- Una cámara RGB que almacena tres canales de datos en una resolución máxima de 1280x960. Esto hace posible capturar imágenes a color.
- Un emisor infrarrojo y un sensor de profundidad infrarrojo. El emisor emite rayos de luz infrarroja y el sensor de profundidad lee los rayos infrarrojos

reflejados. Los rayos reflejados son convertidos en información de profundidad, midiendo así la distancia entre un objeto y el sensor.

- Un arreglo de micrófonos que contiene cuatro micrófonos para capturar sonido. Debido a que hay cuatro micrófonos es posible grabar audio y también conocer la localización de la fuente de sonido y la dirección de la onda de sonido.
- Un acelerómetro de 3 ejes configurado en un rango 2G, donde G es la aceleración debido a la gravedad. Es posible utilizar el acelerómetro para determinar la orientación del Kinect.
- Un motor para controlar la inclinación del Kinect.

La disposición de estos elementos dentro del Kinect se muestra en la Figura 4.3.

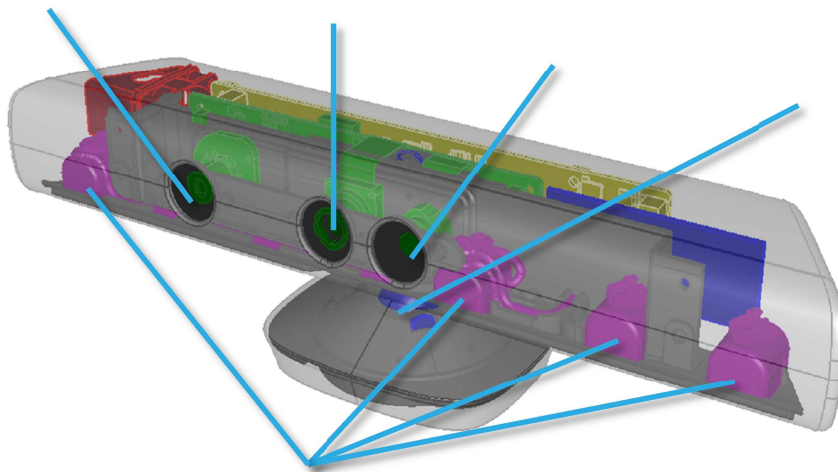


Figura 4.3 Componentes del sensor Kinect para Windows.

FUENTE: MSDN, Kinect para Windows. Recuperado de: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>, Inglés, 2013.

4.1.2 ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES

Las especificaciones de los componentes de Kinect para Windows son:

Tabla 4.1 Especificaciones de los componentes Kinect para Windows.

Kinect	Especificaciones del arreglo
Ángulo de visión	Campo de visión de 43° vertical por 57° horizontal
Rango de inclinación vertical	±27°
Velocidad de cuadro (Profundidad y color)	30 cuadros por segundo (FPS)
Formato de audio	16-kHz, 24-bit mono modulación de código de pulso (PCM)
Características de entrada de audio	Arreglo de 4 micrófonos con convertidores análogo-digital de 24bits (ADC) y un procesador de señales que incluye cancelación de eco acústico y supresión de ruido
Características del acelerómetro	Un acelerómetro 2G/4G/8G configurado para rango 2G con una precisión de 1°

FUENTE: MSDN, Kinect para Windows. Recuperado de: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>, Inglés, 2013.

El campo de visión horizontal y vertical se muestra en la Figura 4.4 y la Figura 4.5 respectivamente.

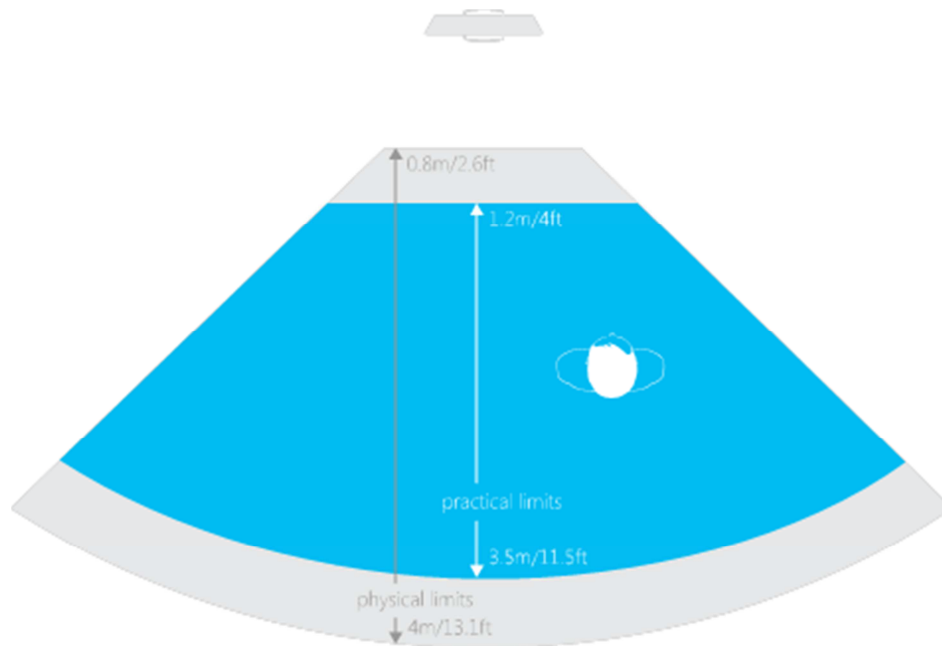


Figura 4.4 Rango de visión horizontal del sensor Kinect.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973074.aspx>, Inglés, 2013.

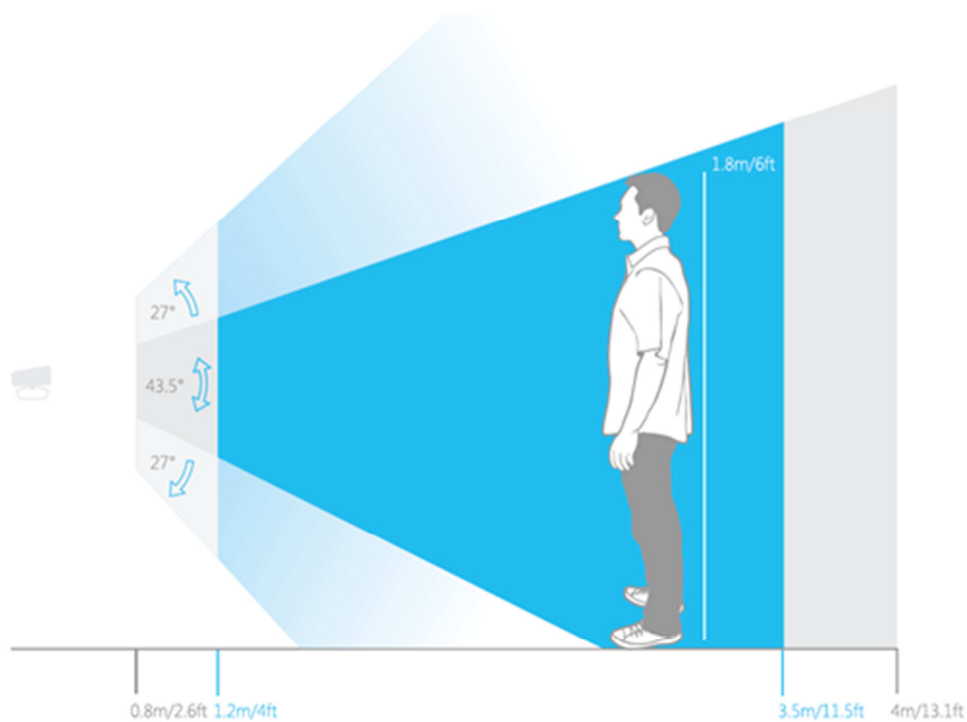


Figura 4.5 Rango de visión vertical del sensor Kinect.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973074.aspx>, Inglés, 2013.

4.1.3 FUNCIONAMIENTO DEL SEGUIMIENTO DE CUERPO DEL SENSOR KINECT

Hay diferentes componentes que hacen del sensor Kinect un gran avance tecnológico. Su hardware está bien diseñado y hace su trabajo a un precio accesible. Su funcionamiento se basa en una técnica de reconocimiento de patrones clásico pero implementado de una forma ingeniosa.

Han existido diferentes dispositivos para seguimiento de cuerpo antes, pero el gran problema es que tienen la necesidad de que el usuario se pare en una pose de calibración para que pueda ser localizado por su algoritmo usando emparejamiento simple. El dispositivo usa entonces un algoritmo de seguimiento desde este punto para seguir el movimiento del cuerpo. La idea básica es que si en el primer cuadro se tiene un área identificada como un brazo, en el siguiente cuadro el brazo no puede ser movido muy lejos y así simplemente se intenta emparejar áreas cerca a la primera posición.

Los algoritmos de seguimiento son buenos en teoría pero en práctica fallan si la posición del cuerpo se pierde por cualquier razón y además son particularmente malos para tratar con otros objetos que pueden ocultar la persona de ser seguida aunque sea por un breve momento. Además una vez que un cuerpo es perdido puede tomar un largo tiempo readquirir los datos si es que llega a ser posible.

Los investigadores de Microsoft fueron de regreso a los principios y decidieron construir un sistema de reconocimiento de cuerpo que no dependiera del seguimiento de esqueleto pero que localice las partes del cuerpo basado en un análisis local de cada pixel. Los patrones de reconocimiento tradicional trabajan entrenando una toma de decisión desde algunas muestras del objeto. Para que esto funcione generalmente se presenta un clasificador con algunas medidas de “características”, las cuales se espera contengan la información necesaria para reconocer el objeto. En muchos casos la tarea difícil es diseñar estas características a ser medidas.

Entonces es así que las características que fueron usadas para el Kinect contienen la información necesaria para identificar las partes del cuerpo. Estas características están basadas en una fórmula simple.

Donde (u, v) son un par de vectores desplazamiento y $d(x)$ es la profundidad (Distancia desde el Kinect y un pixel en la posición x). Esta es la diferencia en profundidad hacia dos pixeles a una pequeña distancia (offset) desde el pixel objetivo definidos por u y v .

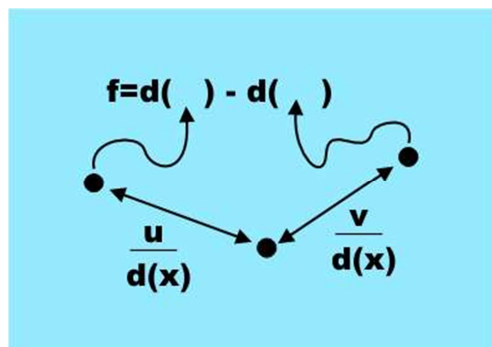


Figura 4.6 Representación gráfica de las características del clasificador usado por el Kinect.

FUENTE: <http://www.i-programmer.info/news/105-artificial-intelligence/2176-kinects-ai-breakthrough-explained.html>, Inglés, 2011.

La única complicación es que este offset está escalado por la distancia al pixel objetivo es decir dividido para $d(x)$. Esto hace a los offset de profundidad independientes y son escalados por el aparente tamaño del cuerpo. Por lo tanto estas características miden de cierta manera la forma 3D del área alrededor del pixel objetivo. Estas características son suficientes para saber la diferencia entre por ejemplo un brazo o una pierna.

El siguiente paso de los investigadores fue entrenar un tipo de clasificador llamado un bosque de decisiones, es decir una colección de árboles de decisión. Cada árbol fue entrenado con un conjunto de características en millones de

imágenes de profundidad, con diferentes posiciones, tamaños del cuerpo y ropa que fueron pre-etiquetadas con las partes objetivo del cuerpo. Estos árboles de decisión fueron modificados hasta que hicieron una correcta clasificación de una parte particular del cuerpo, sometidos a pruebas en este conjunto de imágenes.

Los clasificadores entrenados asignan una probabilidad a cada píxel de ser parte de cada parte del cuerpo. La siguiente fase del algoritmo simplemente recoge las áreas de mayor probabilidad para cada parte del cuerpo. Así un área será asignada a la categoría “pierna” si el clasificador de pierna tiene una máxima probabilidad en esa área. La fase final consiste en calcular la posición de las articulaciones relativas a las áreas identificadas como partes del cuerpo particulares. En la Figura 4.7 se muestran coloreadas las áreas de diferentes partes del cuerpo con máxima probabilidad.

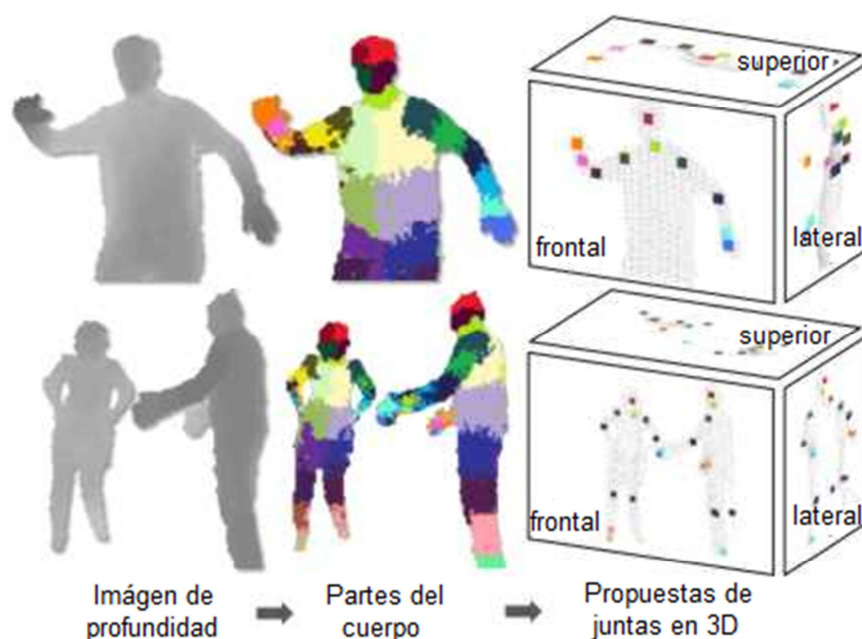


Figura 4.7 Fases del funcionamiento del seguimiento de cuerpo del Kinect.

FUENTE: <http://www.i-programmer.info/news/105-artificial-intelligence/2176-kinects-ai-breakthrough-explained.html>, Inglés, 2011.

Todo esto es fácil de calcular debido a que solo involucra los valores de profundidad de tres píxeles y puede ser manejado por la GPU (Unidad de

Procesamiento Gráfico). Por esta razón el sistema puede correr a 200 cuadros por segundo. Este sistema no necesita una pose de calibración porque cada cuadro es analizado independientemente, así que el algoritmo no realiza seguimiento como en los algoritmos de seguimiento, por lo que no hay problema si se pierde la imagen del cuerpo. Además este sistema puede manejar imágenes de varios cuerpos al mismo tiempo.

4.1.4 ESPACIOS DE COORDENADAS

El sensor Kinect transmite datos de color, profundidad y esqueleto un cuadro a la vez. Esta sección describe los espacios de coordenadas para los datos de profundidad y esqueleto ya que serán los utilizados para conocer la ubicación del usuario.

4.1.4.1 Espacio de coordenadas de profundidad

En cada cuadro, el sensor de profundidad captura una imagen en escala de grises de cada cosa visible en el campo de visión del sensor de profundidad. Un cuadro está formado por píxeles, cuyo tamaño está dado por la configuración especificada por el programador. Cada píxel contiene la distancia cartesiana, en milímetros, desde el plano de la cámara hasta el objeto más cercano en la coordenada particular (x, y) como se muestra en la Figura 4.8. Las coordenadas (x, y) de un cuadro de profundidad no representan unidades físicas en el cuarto; sino que, representan la ubicación de un píxel en el cuadro de profundidad.

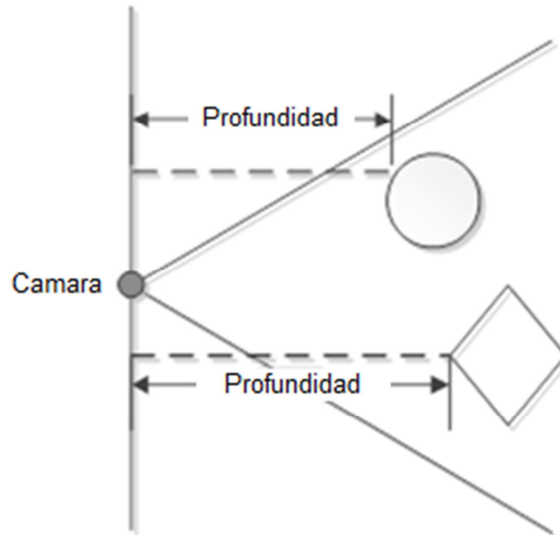


Figura 4.8 Valores de las muestras de profundidad.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973078.aspx>, Inglés, 2013.

4.1.4.1.1 Rangos del espacio de profundidad

El sensor de profundidad tiene dos rangos de profundidad configurables: el rango por default y el rango cercano. Los cuales se muestran en la Figura 4.9.

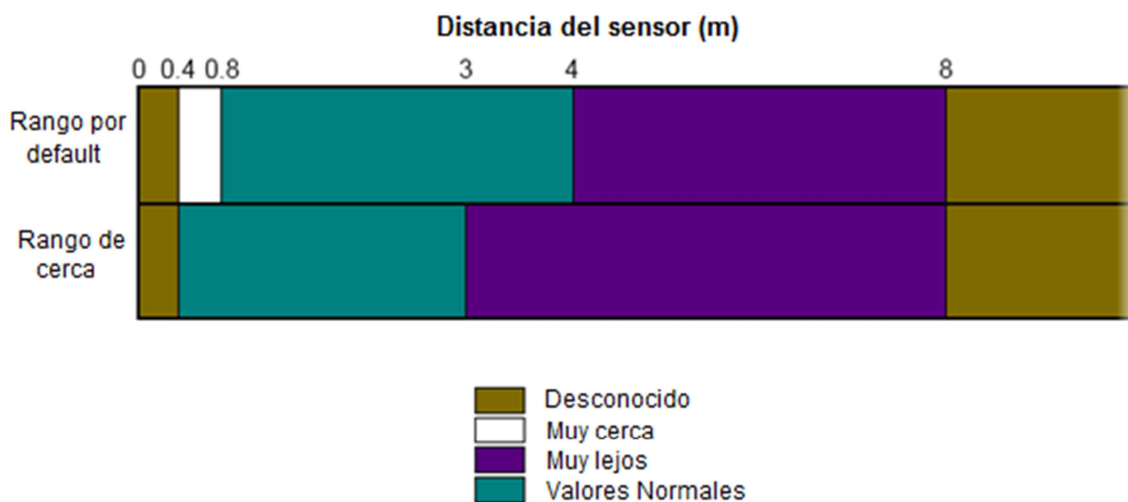


Figura 4.9 Rangos del sensor de profundidad.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973078.aspx>, Inglés, 2013.

4.1.4.2 Espacio de coordenadas del esqueleto

En cada cuadro, la imagen de profundidad capturada es procesada por el sensor Kinect para transformarla en datos de esqueleto. Los datos de esqueleto contienen la posición 3D de esqueletos humanos de hasta dos personas que sean visibles para el sensor de profundidad. La posición de un esqueleto y cada articulación del mismo es grabada como coordenadas (x, y, z) expresadas en metros. Los ejes x, y, z son los ejes del cuerpo del sensor de profundidad como se muestra en la Figura 4.10.

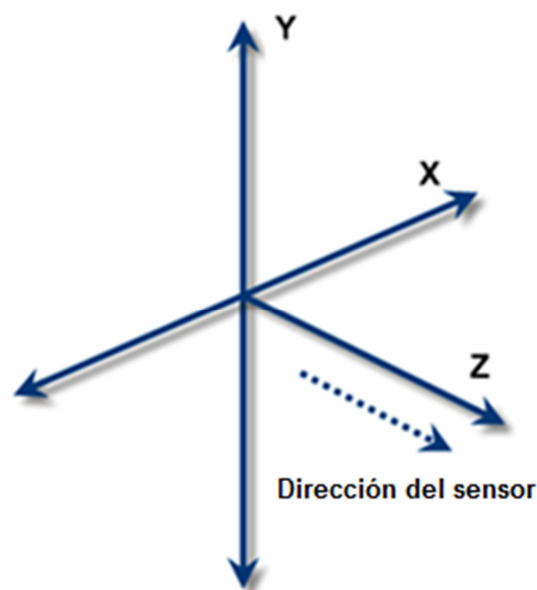


Figura 4.10 Ejes coordenados del espacio de coordenadas del esqueleto.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973078.aspx>, Inglés, 2013.

Este es un sistema de coordenadas que ubica al sensor Kinect en el origen con el eje z positivo en dirección hacia donde apunta el dispositivo. El eje y positivo se extiende hacia arriba y el eje x positivo se extiende hacia la izquierda del sensor.

4.1.5 ARTICULACIONES DEL ESQUELETO CAPTURADO POR EL SENSOR KINECT

Los esqueletos capturados por el sensor Kinect proveen información detallada acerca de la posición de veinte articulaciones en el campo de visión de la cámara. Estas articulaciones se muestran en la Figura 4.11 con sus nombres en inglés, tal como se utilizan en las librerías de programación del sensor Kinect para Windows SDK.

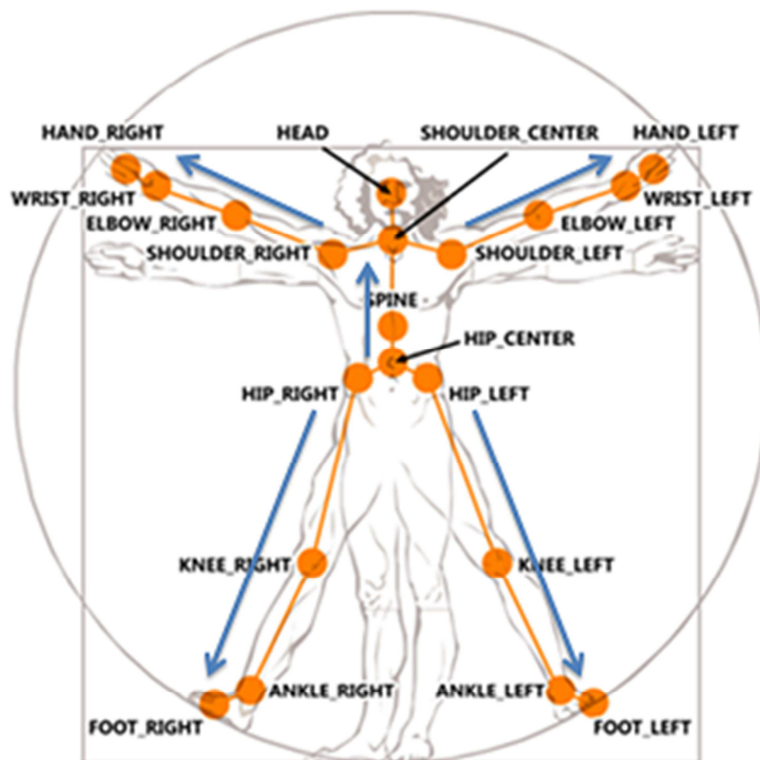


Figura 4.11 Articulaciones captadas por el sensor Kinect para Windows.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131025.aspx>, Inglés, 2013.

Es importante recalcar que para los objetivos de este proyecto el usuario es una persona discapacitada que utiliza silla de ruedas por lo que este se encuentra siempre sentado. Las librerías de Kinect para Windows SDK nos permiten configurar dos modos para seguimiento: “default” y “sentado” (seated). Las articulaciones que capturan cada uno se muestra en la Figura 4.12.

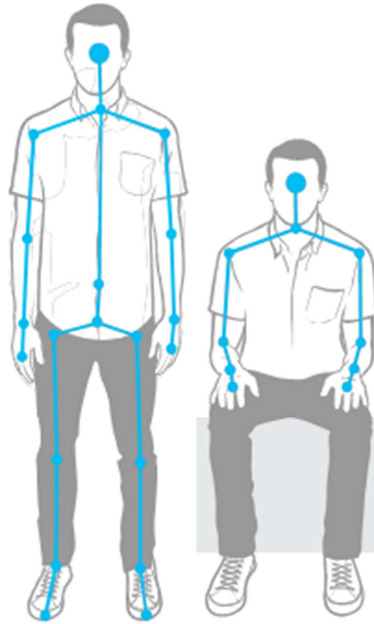


Figura 4.12 Modos de seguimiento: default y sentado.

FUENTE: MSDN, Documentación Kinect para Windows SDK, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh973077.aspx>, Inglés, 2013.

El modo de seguimiento “sentado” está diseñado para seguir personas que están sentadas en una silla o un sofá, o para quienes su parte inferior del cuerpo no es completamente visible para el sensor. El modo default, en contraste, está optimizado para reconocer y seguir personas que están paradas y son completamente visibles por el sensor. Por lo que para este proyecto la mejor opción es utilizar el modo de seguimiento “sentado”.

Este modo de seguimiento reporta la posición de diez articulaciones superiores del cuerpo (hombros, codos, muñecas, manos y cabeza). Además el modo de seguimiento “sentado” usa el movimiento del usuario para detectarlo y diferenciarlo del fondo, como la silla o el sofá.

Es importante tomar en cuenta que para que el usuario sea reconocido en el modo “sentado” este debe mover sus manos o inclinarse hacia cualquier dirección, caso contrario se dificulta la detección del mismo por parte del sensor Kinect.

4.2 VALIDACIÓN DEL SENSOR KINECT

Para cumplir con los objetivos de este proyecto es necesario que el sensor Kinect junto con las librerías de Kinect para Windows SDK nos entregue datos que cumplan con los requerimientos del sistema de visión artificial los cuales son:

- Exactitud de la posición del usuario respecto al RAD4-23.
- Precisión de la distancia entre el RAD4-23 y el usuario.
- Rango de reconocimiento cumple con los requisitos para el funcionamiento dentro de un supermercado.

Por lo que fue sometido a pruebas de funcionamiento para comprobar que cumpla con estos requerimientos. En este capítulo se detalla la ejecución de estas pruebas y los resultados obtenidos.

4.2.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

La ejecución de estas pruebas tiene como objetivo la medición de la posición del usuario por parte del Kinect y la precisión que este nos entrega en diferentes ubicaciones del usuario, las cuales se eligieron y limitaron según el ambiente de un supermercado. Es importante notar que no se necesita una excelente exactitud para un funcionamiento correcto del RAD4-23, sin embargo dependiendo de la exactitud que se pueda tener se podrá lograr un control más fino del robot.

Para realizar estas pruebas de funcionamiento necesitamos probar las diferentes posiciones donde puede ubicarse el usuario respecto al robot, las cuales consideramos las más relevantes puesto que serán las que definan el movimiento del mismo. Se tomó en cuenta entonces el rango en la dirección X en la que el usuario puede moverse dentro de dos perchas de un supermercado. El caso más crítico se considera una separación entre las perchas de 1.6 metros. Suponiendo que el robot se encuentra en la mitad de las dos perchas, tendríamos para cada lado una distancia de 0.8 metros sin embargo restamos un espacio de

14cm por seguridad para evitar colisiones, entonces el usuario se encontrará a una distancia aproximada de:

$$distX = 0.8 - 0.14$$

$$distX = 0.66 \text{ m}$$

La distancia en Z en cambio se limita en 4 puntos:

- 1.6m Distancia mínima entre el robot y el usuario.
- 1.8m Rango hasta donde se determina que el usuario está cerca.
- 2.5m Máxima distancia a la que debe estar el usuario.
- 3.2m Distancia teórica donde el sensor Kinect pierde el seguimiento del usuario.

El primer punto está definido por el largo del RAD4-23 que es aproximadamente de un metro y la consideración de que el usuario está mirando hacia el sensor. En este caso los pies del usuario estarían cerca del robot y el usuario en sí estaría en el espaldar de la silla. Entonces tendríamos 1 metro más aproximadamente 0.5 metros de largo de la silla de ruedas y una distancia de 0.1 metros para evitar colisiones.

$$distZ_1 = 1 + 0.5 + 0.1$$

$$distZ_1 = 1.6 \text{ m}$$

El segundo punto define cuando el usuario está cerca del robot así que agregamos un rango de 0.2m de manera que tenemos:

$$distZ_2 = 1.6 + 0.2$$

$$distZ_2 = 1.8 \text{ m}$$

El tercer punto es la distancia máxima a la que se desea que este el usuario para que el robot se encuentre cerca del mismo en todo momento. Si tomamos en cuenta que de los 2.5m es la distancia a la que está ubicado el

sensor Kinect que está colocado en la parte de atrás del robot, entonces tendríamos un metro de largo del robot, por lo que en realidad el usuario estaría a 1.5m del robot.

Adicional a estos puntos también se tomó en cuenta el rango horizontal del campo de visión del Kinect, del cual se habló en el capítulo 14.1.2 y el cuál es de 57 grados. Donde se busca la distancia X para cada punto Z para la cual el sensor Kinect deja de reconocer al usuario.

Utilizando estos puntos en X y Z y el ángulo de visión horizontal se realizó entonces un plano de pruebas como se muestra en la Figura 4.13.

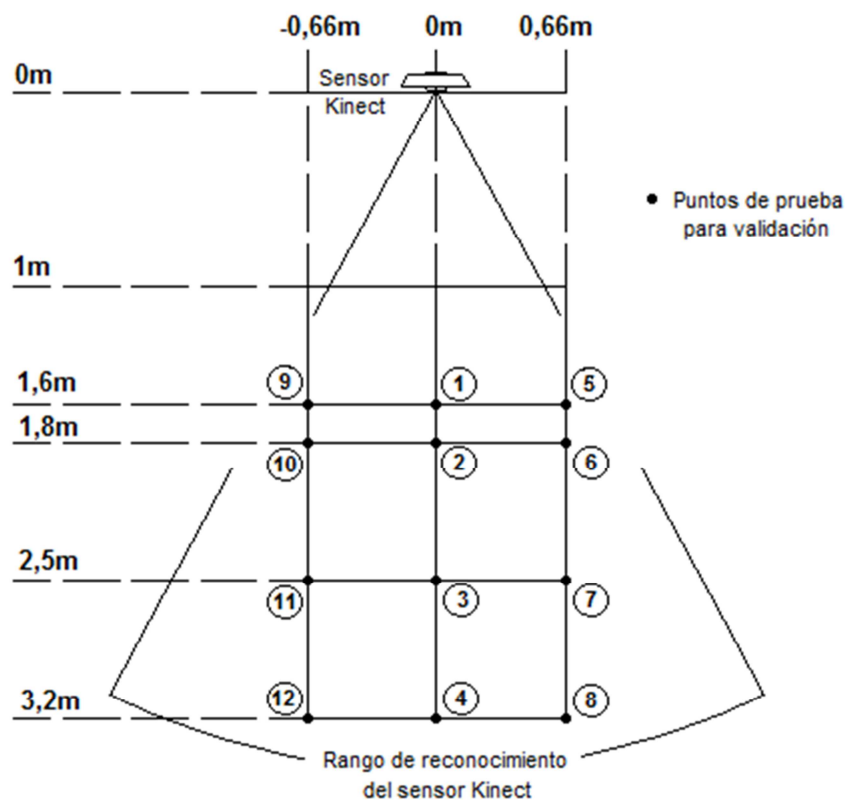


Figura 4.13 Plano de pruebas

FUENTE: Elaboración propia.

En este plano tenemos los diferentes puntos donde se realizarán las pruebas respectivas.

4.2.1.1 METODOLOGÍA Y VARIABLES A MEDIR

Debido a que la ubicación del usuario nos permite evaluar los dos requerimientos del sistema de visión artificial, las variables que nos interesa medir son las distancias Z y X del usuario respecto al RAD4-23. La distancia Z nos permitirá saber si el robot debe acercarse al usuario o no, debido a que este se ha movido, y la distancia X nos permite saber si además debemos girar. Adicional a estos dos requerimientos también se desea evaluar si el rango del sensor Kinect puede reconocer sin problemas al usuario en todos los puntos del plano de pruebas.

Para conocer estas distancias se utiliza la característica de seguimiento de esqueleto del sensor Kinect. Dentro del seguimiento de esqueleto tenemos diferentes articulaciones con las que se podría trabajar. Se eligieron dos articulaciones a medir dentro de las 10 que podemos reconocer en el modo "sentado" tratado en el capítulo 4.1.5, el centro de los hombros (SHOULDER_CENTER) y la cabeza (HEAD). Esto debido a que el resto de articulaciones pueden tener más movimiento mientras el usuario realiza sus actividades dentro del supermercado y podría provocar movimiento indeseado por parte del RAD4-23.

Después de estas pruebas además de validar el uso del sensor Kinect, se elegirá la articulación que cumpla mejor con los requerimientos del sistema de visión artificial. Adicionalmente a las pruebas de los requerimientos también se mide la distancia X en los diferentes puntos Z para conocer el rango de reconocimiento del sensor Kinect, lo cual servirá para la programación.

En base a estas variables se estableció una metodología para la ejecución de las pruebas, la cual se detalla en la Tabla 4.2. El software para pruebas es un programa que se desarrolló para que reconozca al usuario y muestra en pantalla el valor en metros de Z y X tanto para la cabeza como para el centro de los hombros.

Tabla 4.2 Metodología para la ejecución de las pruebas de validación del sensor Kinect

Objetivo	Cuantificar la exactitud y precisión de la posición del usuario y si el rango horizontal de reconocimiento está dentro de las posiciones que se desea trabajar.
Técnica	Comparación de la posición del usuario en el punto señalado con la entregada por el sensor Kinect.
Cuantificadores	Exactitud: Error absoluto en los datos obtenidos. Precisión: Desviación estándar de los datos obtenidos. Rango: No tiene cuantificador
Recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor Kinect • Software para pruebas • Plano de pruebas • Usuario • Silla de ruedas
Metodología	<ol style="list-style-type: none"> 1. Arrancar el software para pruebas con el sensor Kinect. 2. Ubicar al usuario en el primer punto señalado dentro del plano de pruebas, con el usuario mirando hacia el sensor Kinect. 3. Anotar el valor de la distancia X y Z del centro de los hombros y de la cabeza, entregados por el software para pruebas con el sensor Kinect. 4. Sacar al usuario del punto señalado y volver a ubicarlo. 5. Realizar 5 repeticiones con el mismo punto y con diferentes posturas del usuario. 6. Calcular el valor absoluto y la desviación estándar de los datos obtenidos. 7. Repetir el procedimiento para cada punto señalado. 8. Repetir todo el procedimiento pero ahora con el usuario dando las espaldas al sensor Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2 Datos obtenidos

Desde la Tabla 4.3 hasta la Tabla 4.62 se detallan los datos obtenidos para cada posición del plano de pruebas para los rangos de X. Dentro de cada posición se muestran los datos de la posición del usuario tanto mirando hacia el sensor Kinect como de espaldas al mismo. Además se muestran tablas de error absoluto, relativo y desviación estándar para cada posición.

4.2.1.2.1 Posición Z = 1.6m X = 0m

Tabla 4.3 Datos obtenidos para la posición Z = 1.6m y X = 0m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,588	0,002	1,590	0,002	1,628	0,009	1,635	0,009
2	1,604	0,002	1,607	0,004	1,603	0,025	1,645	0,025
3	1,593	0,004	1,599	0,004	1,605	0,001	1,626	0,004
4	1,596	0,004	1,590	0,005	1,621	0,023	1,631	0,021
5	1,605	0,001	1,592	0,008	1,604	0,018	1,688	0,016

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición la Z = 1.6m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,012	-0,002	0,75	-0,2	0,010	-0,002	0,63	-0,20
2	-0,004	-0,002	-0,25	-0,2	-0,007	-0,004	-0,44	-0,40
3	0,007	-0,004	0,44	-0,4	0,001	-0,004	0,06	-0,40
4	0,004	-0,004	0,25	-0,4	0,010	-0,005	0,63	-0,50
5	-0,005	-0,001	-0,31	-0,1	0,008	-0,008	0,50	-0,80
Promedio	0,003	-0,003	0,18	-0,26	0,004	-0,005	0,28	-0,46

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.5 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para X (m)
0,007	0,001	0,007	0,002

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.6 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X(m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,028	-0,009	-1,75	-0,90	-0,035	-0,009	-2,19	-0,90
2	-0,003	-0,025	-0,19	-2,50	-0,045	-0,025	-2,81	-2,50
3	-0,005	-0,001	-0,31	-0,10	-0,026	-0,004	-1,62	-0,40
4	-0,021	-0,023	-1,31	-2,30	-0,031	-0,021	-1,94	-2,10
5	-0,004	-0,018	-0,25	-1,80	-0,088	-0,016	-5,50	-1,60
Promedio	-0,012	-0,015	-0,76	-1,52	-0,045	-0,015	-2,81	-1,50

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.7 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,012	0,010	0,025	0,009

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.2 Posición Z = 1.8m X = 0m

Tabla 4.8 Datos obtenidos para la posición Z = 1.8m y X = 0m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,806	0,003	1,804	0,004	1,772	0,034	1,863	0,031
2	1,809	0,013	1,801	0,021	1,821	0,029	1,895	0,029
3	1,812	0,002	1,806	0,009	1,825	0,035	1,802	0,033
4	1,827	-0,008	1,831	0,003	1,837	0,018	1,818	0,071
5	1,821	0,005	1,818	0,012	1,802	0,015	1,808	0,015

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.9 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,006	-0,003	-0,33	-0,30	-0,004	-0,004	-0,22	-0,40
2	-0,009	-0,013	-0,50	-1,30	-0,001	-0,021	-0,06	-2,10
3	-0,012	-0,002	-0,67	-0,20	-0,006	-0,009	-0,33	-0,90
4	-0,027	0,008	-1,50	0,80	-0,031	-0,003	-1,72	-0,30
5	-0,021	-0,005	-1,17	-0,50	-0,018	-0,012	-1,00	-1,20
Promedio	-0,015	-0,003	-0,83	-0,30	-0,012	-0,010	-0,67	-0,98

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.10 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,009	0,008	0,012	0,007

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.11 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 1.8m y X = 0m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X(m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,028	-0,034	1,56	-3,40	-0,063	-0,031	-3,50	-3,10
2	-0,021	-0,029	-1,17	-2,90	-0,095	-0,029	-5,28	-2,90
3	-0,025	-0,035	-1,39	-3,50	-0,002	-0,033	-0,11	-3,30
4	-0,037	-0,018	-2,06	-1,80	-0,018	-0,071	-1,00	-7,10
5	-0,002	-0,015	-0,11	-1,50	-0,008	-0,015	-0,44	-1,50
Promedio	-0,011	-0,026	-0,63	-2,62	-0,037	-0,036	-2,07	-3,58

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.12 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y
X = 0m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,025	0,009	0,040	0,021

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.3 Posición Z = 2.5m X = 0m

Tabla 4.13 Datos obtenidos para la posición Z = 2.5m y X = 0m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	2,512	0,005	2,526	0,021	2,432	-0,001	2,411	-0,004
2	2,513	0,006	2,531	0,018	2,439	-0,001	2,428	-0,012
3	2,504	-0,001	2,500	0,012	2,475	-0,021	2,477	-0,033
4	2,518	0,024	2,525	0,037	2,472	0,000	2,472	-0,005
5	2,527	-0,005	2,531	0,013	2,487	0,001	2,478	0,001

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.14 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 2.5m y X = 0m, usuario de frente.**

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,012	-0,005	-0,48	-0,50	-0,026	-0,021	-1,04	-2,10
2	-0,013	-0,006	-0,52	-0,60	-0,031	-0,018	-1,24	-1,80
3	-0,004	0,001	-0,16	0,10	0	-0,012	0,00	-1,20
4	-0,018	-0,024	-0,72	-2,40	-0,025	-0,037	-1,00	-3,70
5	-0,027	0,005	-1,08	0,50	-0,031	-0,013	-1,24	-1,30
Promedio	-0,015	-0,006	-0,59	-0,58	-0,023	-0,020	-0,90	-2,02

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.15 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y
X = 0m, usuario de frente.**

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,008	0,011	0,013	0,010

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.16 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 2.5m y X = 0m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,068	0,001	2,72	0,10	0,089	0,004	3,56	0,40
2	0,061	0,001	2,44	0,10	0,072	0,012	2,88	1,20
3	0,025	0,021	1,00	2,10	0,023	0,033	0,92	3,30
4	0,028	0,000	1,12	0,00	0,028	0,005	1,12	0,50
5	0,013	-0,001	0,52	-0,10	0,022	-0,001	0,88	-0,10
Promedio	0,039	0,004	1,56	0,44	0,047	0,011	1,87	1,06

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.17 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,024	0,009	0,031	0,013

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.4 Posición Z = 3.2m X = 0m

Tabla 4.18 Datos obtenidos para la posición Z = 3.2m y X = 0m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	3,22	0,03	3,22	0,04	3,19	0,04	3,16	0,05
2	3,22	0,04	3,21	0,06	3,18	0,06	3,14	0,06
3	3,23	0,01	3,24	0,05	3,21	0,04	3,17	0,04
4	3,21	0,00	3,20	0,02	3,20	0,05	3,17	0,05
5	3,21	0,00	3,20	0,02	3,19	0,05	3,15	0,05

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.19 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,02	-0,03	-0,63	-3,00	-0,02	-0,04	-0,63	-4,00
2	-0,02	-0,04	-0,63	-4,00	-0,01	-0,06	-0,31	-6,00
3	-0,03	-0,01	-0,94	-1,00	-0,04	-0,05	-1,25	-5,00
4	-0,01	0,00	-0,31	0,00	0,00	-0,02	0,00	-2,00
5	-0,01	0,00	-0,31	0,00	0,00	-0,02	0,00	-2,00
Promedio	-0,018	-0,016	-0,56	-1,60	-0,01	-0,038	-0,44	-3,80

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.20 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,008	0,018	0,017	0,018

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.21 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,01	-0,04	0,31	-4,00	0,04	-0,05	1,25	-5,00
2	0,02	-0,06	0,63	-6,00	0,06	-0,06	1,88	-6,00
3	-0,01	-0,04	-0,31	-4,00	0,03	-0,04	0,94	-4,00
4	0,00	-0,05	0,00	-5,00	0,03	-0,05	0,94	-5,00
5	0,01	-0,05	0,31	-5,00	0,05	-0,05	1,56	-5,00
Promedio	0,006	-0,048	0,19	-4,80	0,042	-0,050	1,31	-5,00

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.22 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,011	0,008	0,013	0,007

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.5 Posición Z = 1.6m X = 0.66m

Tabla 4.23 Datos obtenidos para la posición Z = 1.6m y X = 0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,616	0,671	1,601	0,676	1,615	0,683	1,613	0,672
2	1,593	0,674	1,582	0,673	1,618	0,673	1,617	0,673
3	1,608	0,665	1,593	0,668	1,606	0,675	1,613	0,672
4	1,613	0,667	1,592	0,663	1,611	0,676	1,612	0,673
5	1,596	0,665	1,580	0,673	1,613	0,668	1,608	0,673

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.24 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = 0.66m, usuario de frente.

Nº	Usuario de frente							
	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,016	-0,011	-1,00	-1,67	0,00	-0,016	-0,06	-2,42
2	0,007	-0,014	0,44	-2,12	0,02	-0,013	1,13	-1,97
3	-0,008	-0,005	-0,50	-0,76	0,01	-0,008	0,44	-1,21
4	-0,013	-0,007	-0,81	-1,06	0,01	-0,003	0,50	-0,45
5	0,004	-0,005	0,25	-0,76	0,02	-0,013	1,25	-1,97
Promedio	-0,005	-0,008	-0,32	-1,27	0,01	-0,011	0,65	-1,61

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.25 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,010	0,004	0,009	0,005

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.26 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.6m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,015	-0,023	-0,94	-3,48	-0,013	-0,012	-0,81	-1,82
2	-0,018	-0,013	-1,13	-1,97	-0,017	-0,013	-1,06	-1,97
3	-0,006	-0,015	-0,38	-2,27	-0,013	-0,012	-0,81	-1,82
4	-0,011	-0,016	-0,69	-2,42	-0,012	-0,013	-0,75	-1,97
5	-0,013	-0,008	-0,81	-1,21	-0,008	-0,013	-0,50	-1,97
Promedio	-0,013	-0,015	-0,787	-2,27	-0,013	-0,013	-0,79	-1,91

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.27 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,005	0,005	0,003	0,001

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.6 Posición Z = 1.8m X = 0.66m

Tabla 4.28 Datos obtenidos para la posición Z = 1.8m y X = 0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,818	0,667	1,795	0,673	1,793	0,683	1,788	0,675
2	1,828	0,656	1,802	0,665	1,791	0,681	1,798	0,677
3	1,834	0,654	1,794	0,657	1,814	0,665	1,800	0,656
4	1,813	0,669	1,803	0,674	1,813	0,671	1,799	0,673
5	1,817	0,653	1,801	0,665	1,812	0,678	1,800	0,672

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.29 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 1.8m y X = 0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,018	-0,007	-1,00	-1,06	0,01	-0,013	0,28	-1,97
2	-0,028	0,004	-1,56	0,61	0,00	-0,005	-0,11	-0,76
3	-0,034	0,006	-1,89	0,91	0,01	0,003	0,33	0,45
4	-0,013	-0,009	-0,72	-1,36	0,00	-0,014	-0,17	-2,12
5	-0,017	0,007	-0,94	1,06	0,00	-0,005	-0,06	-0,76
Promedio	-0,022	0,000	-1,22	0,03	0,00	-0,007	0,06	-1,03

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.30 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y
X = 0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,009	0,008	0,004	0,007

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.31 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 1.8m y X = 0.66m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,007	-0,023	0,39	-3,48	0,012	-0,015	0,67	-2,27
2	0,009	-0,021	0,50	-3,18	0,002	-0,017	0,11	-2,58
3	-0,014	-0,005	-0,78	-0,76	0,000	0,004	0,00	0,61
4	-0,013	-0,011	-0,72	-1,67	0,001	-0,013	0,06	-1,97
5	-0,012	-0,018	-0,67	-2,73	0,000	-0,012	0,00	-1,82
Promedio	-0,005	-0,016	-0,256	-2,36	0,003	-0,011	0,17	-1,61

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.32 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,012	0,007	0,005	0,008

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.7 Posición Z = 2.5m X = 0.66m

Tabla 4.33 Datos obtenidos para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	2,523	0,657	2,512	0,672	2,506	0,671	2,490	0,677
2	2,502	0,672	2,493	0,673	2,504	0,677	2,493	0,681
3	2,497	0,665	2,491	0,668	2,514	0,667	2,497	0,674
4	2,507	0,678	2,497	0,658	2,516	0,675	2,500	0,683
5	2,523	0,679	2,514	0,679	2,517	0,672	2,499	0,679

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.34 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,023	0,003	-0,92	0,45	-0,01	-0,012	-0,48	-1,82
2	-0,002	-0,012	-0,08	-1,82	0,01	-0,013	0,28	-1,97
3	0,003	-0,005	0,12	-0,76	0,01	-0,008	0,36	-1,21
4	-0,007	-0,018	-0,28	-2,73	0,00	0,002	0,12	0,30
5	-0,023	-0,019	-0,92	-2,88	-0,01	-0,019	-0,56	-2,88
Promedio	-0,010	-0,010	-0,42	-1,55	0,00	-0,010	-0,06	-1,52

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.35 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,012	0,009	0,011	0,008

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.36 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,006	-0,011	-0,24	-1,67	0,010	-0,017	0,40	-2,58
2	-0,004	-0,017	-0,16	-2,58	0,007	-0,021	0,28	-3,18
3	-0,014	-0,007	-0,56	-1,06	0,003	-0,014	0,12	-2,12
4	-0,016	-0,015	-0,64	-2,27	0,000	-0,023	0,00	-3,48
5	-0,017	-0,012	-0,68	-1,82	0,001	-0,019	0,04	-2,88
Promedio	-0,011	-0,012	-0,456	-1,88	0,004	-0,019	0,17	-2,85

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.37 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,006	0,004	0,004	0,003

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.8 Posición Z = 3.2m X = 0.66m

Tabla 4.38 Datos obtenidos para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	3,20	0,65	3,20	0,66	3,21	0,66	3,12	0,68
2	3,21	0,63	3,20	0,67	3,19	0,69	3,19	0,68
3	3,19	0,65	3,19	0,67	3,17	0,65	3,16	0,66
4	3,19	0,64	3,19	0,67	3,18	0,66	3,17	0,68
5	3,20	0,65	3,19	0,67	3,19	0,66	3,21	0,67

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.39 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,00	0,01	0,00	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,01	0,03	-0,31	4,55	0,00	-0,01	0,00	-1,52
3	0,01	0,01	0,31	1,52	0,01	-0,01	0,31	-1,52
4	0,01	0,020	0,31	3,03	0,01	-0,01	0,31	-1,52
5	0,00	0,010	0,00	1,52	0,01	-0,01	0,31	-1,52
Promedio	0,002	0,016	0,06	2,42	0,01	-0,008	0,19	-1,21

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.40 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,008	0,009	0,005	0,004

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.41 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,010	0,000	-0,31	0,00	0,080	-0,02	2,50	-3,03
2	0,010	-0,030	0,31	-4,55	0,010	-0,02	0,31	-3,03
3	0,030	0,010	0,94	1,52	0,040	0,00	1,25	0,00
4	0,020	0,000	0,63	0,00	0,030	-0,02	0,94	-3,03
5	0,010	0,000	0,31	0,00	-0,010	-0,01	-0,31	-1,52
Promedio	0,012	-0,004	0,375	-0,61	0,030	-0,014	0,94	-2,12

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.42 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = 0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,015	0,015	0,034	0,009

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.9 Posición Z = 1.6m X = -0.66m

Tabla 4.43 Datos obtenidos para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,593	-0,662	1,601	-0,663	1,598	-0,672	1,584	-0,663
2	1,606	-0,671	1,616	-0,678	1,605	-0,670	1,578	-0,662
3	1,598	-0,661	1,592	-0,641	1,601	-0,662	1,592	-0,665
4	1,597	-0,663	1,593	-0,642	1,614	-0,678	1,587	-0,665
5	1,603	-0,664	1,617	-0,659	1,612	-0,681	1,592	-0,668

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.44 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,007	0,002	0,44	-0,30	0,00	0,00	-0,06	-0,45
2	-0,006	0,011	-0,38	-1,67	-0,02	0,018	-1,00	-2,73
3	0,002	0,001	0,13	-0,15	0,01	-0,019	0,50	2,88
4	0,003	0,003	0,19	-0,45	0,01	-0,018	0,44	2,73
5	-0,003	0,004	-0,19	-0,61	-0,02	-0,001	-1,06	0,15
Promedio	0,001	0,004	0,04	-0,64	0,00	-0,003	-0,24	0,52

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.45 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y
X = -0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,005	0,004	0,012	0,016

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.46 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,002	0,012	0,13	-1,82	0,016	0,003	1,00	-0,45
2	-0,005	0,010	-0,31	-1,52	0,022	0,002	1,38	-0,30
3	-0,001	0,002	-0,06	-0,30	0,008	0,01	0,50	-0,76
4	-0,014	0,018	-0,88	-2,73	0,013	0,005	0,81	-0,76
5	-0,012	0,021	-0,75	-3,18	0,008	0,008	0,50	-1,21
Promedio	-0,006	0,013	-0,375	-1,91	0,013	0,005	0,84	-0,70

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.47 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.6m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,007	0,007	0,006	0,002

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.10 Posición Z = 1.8m X = -0.66m

Tabla 4.48 Datos obtenidos para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	1,797	-0,651	1,802	-0,678	1,795	0,673	1,772	0,662
2	1,798	-0,655	1,799	-0,662	1,799	0,663	1,787	0,653
3	1,814	-0,653	1,794	-0,671	1,785	0,662	1,765	0,653
4	1,792	-0,657	1,801	-0,647	1,805	0,671	1,783	0,663
5	1,802	-0,657	1,801	-0,658	1,808	0,667	1,792	0,666

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.49 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,003	-0,009	0,17	1,36	0,00	0,02	-0,11	-2,73
2	0,002	-0,005	0,11	0,76	0,00	0,002	0,06	-0,30
3	-0,014	-0,007	-0,78	1,06	0,01	0,011	0,33	-1,67
4	0,008	-0,003	0,44	0,45	0,00	-0,013	-0,06	1,97
5	-0,002	-0,003	-0,11	0,45	0,00	-0,002	-0,06	0,30
Promedio	-0,001	-0,005	-0,03	0,82	0,00	0,003	0,03	-0,48

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.50 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,008	0,003	0,003	0,012

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.51 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,005	0,013	0,28	-1,97	0,028	0,002	1,56	-0,30
2	0,001	0,003	0,06	-0,45	0,013	-0,007	0,72	1,06
3	0,015	0,002	0,83	-0,30	0,035	-0,01	1,94	1,06
4	-0,005	0,011	-0,28	-1,67	0,017	0,003	0,94	-0,45
5	-0,008	0,007	-0,44	-1,06	0,008	0,006	0,44	-0,91
Promedio	0,002	0,007	0,089	-1,09	0,020	-0,001	1,12	0,09

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.52 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 1.8m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,009	0,005	0,011	0,006

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.11 Posición Z = 2.5m X = -0.66m

Tabla 4.53 Datos obtenidos para la posición Z = 2.5m y X = -0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	2,509	-0,654	2,502	-0,648	2,522	-0,662	2,510	-0,653
2	2,506	-0,634	2,505	-0,633	2,536	-0,672	2,514	-0,648
3	2,523	-0,647	2,498	-0,662	2,512	-0,654	2,495	-0,655
4	2,507	-0,651	2,514	-0,655	2,498	-0,657	2,493	-0,649
5	2,489	-0,681	2,545	-0,682	2,508	-0,661	2,502	-0,652

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.54 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = -0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,009	-0,006	-0,36	0,91	0,00	-0,012	-0,08	1,82
2	-0,006	-0,026	-0,24	3,94	0,00	-0,027	-0,20	4,09
3	-0,023	-0,013	-0,92	1,97	0,00	0,002	0,08	-0,30
4	-0,007	-0,009	-0,28	1,36	-0,01	-0,005	-0,56	0,76
5	0,011	0,021	0,44	-3,18	-0,04	0,022	-1,80	-3,33
Promedio	-0,007	-0,007	-0,27	1,00	-0,01	-0,004	-0,51	0,61

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.55 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = -0.66m, usuario de frente.

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,012	0,017	0,019	0,018

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.56 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición Z = 2.5m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,022	0,002	-0,88	-0,30	-0,010	-0,007	-0,40	1,06
2	-0,036	0,012	-1,44	-1,82	-0,014	-0,012	-0,56	1,82
3	-0,012	-0,006	-0,48	0,91	0,005	-0,005	0,20	0,76
4	0,002	-0,003	0,08	0,45	0,007	-0,011	0,28	1,67
5	-0,008	0,001	-0,32	-0,15	-0,002	-0,008	-0,08	1,21
Promedio	-0,015	0,001	-0,608	-0,18	-0,003	-0,009	-0,11	1,30

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.57 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 2.5m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,014	0,007	0,009	0,003

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.2.12 Posición Z = 3.2m X = -0.66m

Tabla 4.58 Datos obtenidos para la posición Z = 3.2m y X = -0.66m.

Nº	Usuario de frente				Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros		Cabeza		Centro hombros	
	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)
1	3,20	-0,673	3,202	-0,667	3,19	-0,64	3,18	-0,65
2	3,21	-0,676	3,203	-0,671	3,20	-0,67	3,19	-0,67
3	3,21	-0,673	3,189	-0,651	3,21	-0,66	3,20	-0,65
4	3,21	-0,675	3,192	-0,647	3,19	-0,67	3,18	-0,65
5	3,20	-0,672	3,212	-0,662	3,18	-0,65	3,18	-0,65

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.59 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 3.2m y X = -0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	-0,004	0,013	-0,13	-1,97	0,00	0,007	-0,06	-1,06
2	-0,012	0,016	-0,38	-2,42	0,00	0,011	-0,09	-1,67
3	-0,008	0,013	-0,25	-1,97	0,01	-0,009	0,34	1,36
4	-0,012	0,015	-0,38	-2,27	0,01	-0,013	0,25	1,97
5	0,002	0,012	0,06	-1,82	-0,01	0,002	-0,38	-0,30
Promedio	-0,007	0,014	-0,21	-2,09	0,00	0,000	0,01	0,06

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.60 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y
X = -0.66m, usuario de frente.**

Usuario de frente			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,006	0,002	0,009	0,010

FUENTE: Elaboración propia.

**Tabla 4.61 Resultados de error absoluto y error relativo para la posición
Z = 3.2m y X = -0.66m, usuario de espaldas.**

Usuario de espaldas								
Nº	Cabeza				Centro hombros			
	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)	Error absoluto Z (m)	Error absoluto X (m)	Error relativo Z (%)	Error relativo X (%)
1	0,010	-0,020	0,31	3,03	0,020	-0,01	0,63	1,52
2	0,000	0,010	0,00	-1,52	0,010	0,01	0,31	-1,52
3	-0,010	0,000	-0,31	0,00	0,000	-0,010	0,00	1,52
4	0,010	0,010	0,31	-1,52	0,020	-0,01	0,63	1,52
5	0,020	-0,010	0,63	1,52	0,020	-0,01	0,63	1,52
Promedio	0,006	-0,002	0,188	0,30	0,014	-0,006	0,44	0,91

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.62 Resultados de desviación estándar para la posición Z = 3.2m y X = -0.66m, usuario de espaldas.

Usuario de espaldas			
Cabeza		Centro hombros	
Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)	Desviación estándar para Z (m)	Desviación estándar para X (m)
0,011	0,013	0,009	0,009

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.1.3 Análisis de resultados

Desde la Tabla 4.63 a la Tabla 4.68, se muestran los promedios de los errores relativos para cada posición. De manera que podamos tener una visión general del error obtenido con el usuario tanto de frente como de espaldas.

Para X = 0m:

Tabla 4.63 Resumen de errores relativos para X = 0, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	0,18	-0,26	0,28	-0,46
1.8	-0,83	-0,3	-0,67	-0,98
2.5	-0,59	-0,58	-0,9	-2,02
3.2	-0,56	-1,6	-0,44	-3,80
Promedio	-0,45	-0,69	-0,43	-1,82

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.64 Resumen de errores relativos para X = 0, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	-0,76	-1,52	-2,81	-1,50
1.8	-0,63	-2,62	-2,07	-3,58
2.5	1,56	0,44	1,87	1,06
3.2	0,19	-4,8	1,31	-5,00
Promedio	0,09	-2,13	-0,43	-2,26

FUENTE: Elaboración propia.

Para $X = 0.66\text{m}$:

Tabla 4.65 Resumen de errores relativos para $X = 0.66$, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	-0,32	-1,27	0,65	-1,61
1.8	-1,22	0,03	0,06	-1,03
2.5	-0,42	-1,55	-0,06	-1,52
3.2	0,06	2,42	0,19	-1,21
Promedio	-0,48	-0,09	0,21	-1,34

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.66 Resumen de errores relativos para $X = 0.66$, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	-0,79	-2,27	-0,79	-1,91
1.8	-0,26	-2,36	0,17	-1,61
2.5	-0,46	-1,88	0,17	-2,85
3.2	0,38	-0,61	0,94	-2,12
Promedio	-0,28	-1,78	0,12	-2,12

FUENTE: Elaboración propia.

Para $X = -0.66\text{m}$:

Tabla 4.67 Resumen de errores relativos para $X = -0.66$, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	0,04	-0,64	-0,24	0,52
1.8	-0,03	0,82	0,03	-0,48
2.5	-0,27	1,00	-0,51	0,61
3.2	-0,21	-2,09	0,01	0,06
Promedio	-0,12	-0,23	-0,18	0,18

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.68 Resumen de errores relativos para X = -0.66, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (%)	En X (%)	En Z (%)	En X (%)
1.6	-0,38	-1,91	0,84	-0,70
1.8	0,09	-1,09	1,12	0,09
2.5	-0,61	-0,18	-0,11	1,30
3.2	0,19	0,30	0,44	0,91
Promedio	-0,18	-0,72	0,57	0,40

FUENTE: Elaboración propia.

Tal como se puede notar el error relativo que se obtuvo para cualquier posición nunca supera un 5% y en promedio no sobrepasa ni si quiera el 3% por lo que el sensor Kinect tiene una exactitud de la posición del usuario muy buena, cumpliendo así con el primer requerimiento del sistema de visión artificial.

Es importante notar que el error relativo cuando el usuario se encuentra de espaldas es superior a cuando el usuario se encuentra de frente al sensor. Esto debido a que el dispositivo está diseñado para funcionar con el jugador de frente al sensor. Sin embargo se puede notar que el error sigue siendo bajo.

Desde la Tabla 4.69 a la Tabla 4.74 se muestran las desviaciones estándar para cada posición.

Para X = 0m:

Tabla 4.69 Resumen de desviaciones estándar para X = 0m, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,007	0,001	0,007	0,002
1.8	0,009	0,008	0,012	0,007
2.5	0,008	0,011	0,013	0,010
3.2	0,008	0,018	0,017	0,018
Promedio	0,008	0,010	0,012	0,009

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.70 Resumen de desviaciones estándar para X = 0m, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,012	0,010	0,025	0,009
1.8	0,025	0,009	0,040	0,021
2.5	0,024	0,009	0,031	0,013
3.2	0,011	0,008	0,013	0,007
Promedio	0,018	0,009	0,027	0,013

FUENTE: Elaboración propia.

Para X = 0.66m:

Tabla 4.71 Resumen de desviaciones estándar para X = 0.66m, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,010	0,004	0,009	0,005
1.8	0,009	0,008	0,004	0,007
2.5	0,012	0,009	0,011	0,008
3.2	0,008	0,009	0,005	0,004
Promedio	0,010	0,008	0,007	0,006

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.72 Resumen de desviaciones estándar para X = 0.66m, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,005	0,005	0,003	0,001
1.8	0,012	0,007	0,005	0,008
2.5	0,006	0,004	0,004	0,003
3.2	0,015	0,015	0,034	0,009
Promedio	0,010	0,008	0,012	0,005

FUENTE: Elaboración propia.

Para $X = -0.66\text{m}$

Tabla 4.73 Resumen de desviaciones estándar para $X = -0.66\text{m}$, usuario de frente

Distancia en Z	Usuario de frente			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,005	0,004	0,012	0,016
1.8	0,008	0,003	0,003	0,012
2.5	0,012	0,017	0,019	0,018
3.2	0,006	0,002	0,009	0,010
Promedio	0,008	0,007	0,011	0,014

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 4.74 Resumen de desviaciones estándar para $X = -0.66\text{m}$, usuario de espaldas

Distancia en Z	Usuario de espaldas			
	Cabeza		Centro hombros	
	En Z (m)	En X (m)	En Z (m)	En X (m)
1.6	0,007	0,007	0,006	0,002
1.8	0,009	0,005	0,011	0,006
2.5	0,014	0,007	0,009	0,003
3.2	0,011	0,013	0,009	0,009
Promedio	0,010	0,008	0,009	0,005

FUENTE: Elaboración propia.

Como se puede ver la desviación estándar alcanza un valor máximo de 3,4 cm en una de las situaciones, el cual sería nuestro caso más crítico. Sin embargo, hay que notar que se tomó estas medidas en varias posiciones, para visualizar que sucedería si el usuario se moviera lo cual sería lo normal en la práctica, por esa razón se tiene esa desviación en los datos. Además es importante recalcar que el usuario fue quitado del punto y puesto nuevamente en el mismo para cada medición, lo cual cambia en cada momento la medición y en algunos casos resultó en un cambio grande. No obstante la desviación general es muy pequeña, llegando a tener valores menores a 1 cm. Podemos decir entonces que la precisión del sensor Kinect cumple el requisito de precisión del sistema de visión artificial.

Respecto al rango horizontal de reconocimiento, como se puede ver en las tablas de cada posición en el capítulo 4.2.1.2 siempre hubo dato de cada posición, sin importar si el usuario está de frente al Kinect o de espaldas al mismo. Por lo tanto se concluye que el sensor Kinect si cumple con el rango de reconocimiento necesario para el funcionamiento dentro de un supermercado.

Debido a que el sensor Kinect cumple con todos los requisitos que se necesita para el sistema de visión artificial, este es una opción válida para este proyecto.

4.2.1.4 Selección de la articulación para el funcionamiento del RAD4-23

En las tablas del capítulo anterior se puede notar que la diferencia entre la articulación de la cabeza y el centro de los hombros es baja en cuanto a exactitud y precisión es casi imperceptible, debido a que cambian de una posición a otra. Sin embargo durante las pruebas se pudo identificar un problema con la articulación de la cabeza que afectaría el funcionamiento del RAD4-23.

El problema básicamente se trata del movimiento de la misma de una posición a otra. El movimiento de la cabeza es mayor al del tronco del cuerpo mientras el usuario realiza cualquier actividad y aún más si este se acercara a recoger algo de una percha dentro del supermercado. Este movimiento haría que el robot identificara como si el usuario se ha movido hacia alguna dirección y tomaría acciones para seguir esa ubicación. La articulación del centro de los hombros nos permite reducir este inconveniente, por lo tanto se elige la misma para el funcionamiento del RAD4-23.

CAPITULO 5

CONSTRUCCIÓN DEL RAD4-23

En este capítulo se indicará como se fue realizando la construcción de todos los sistemas que conforman al RAD4-23, es decir, se muestra cómo se fueron ensamblando los diferentes elementos, y las conexiones eléctricas que se realizaron entre estos elementos.

Previo a la construcción de los diferentes sistemas cabe resaltar, que se realizaron algunos cambios al diseño comercial del RAD4-23 por motivos económicos y de mano de obra, por lo que se comenzará este capítulo con los cambios realizados y los análisis mecánicos correspondientes de los nuevos componentes.

De manera que en este capítulo tendremos:

- Cambios realizados al diseño comercial del RAD4-23.
- Sistema motriz y estructura.
- Sistema de seguimiento y control.
- Sistema de detección.
- Sistema de alimentación.
- Resultado de la construcción del RAD4-23.

5.1 DISEÑO DEL PROCESO DE CONTRUCCIÓN

Se realiza un diagrama de bloque donde se indica la correlación entre los diferentes elementos, los datos y especificaciones de cada acción realizada en el proceso de construcción, el diagrama se muestra en la Figura 5.6.

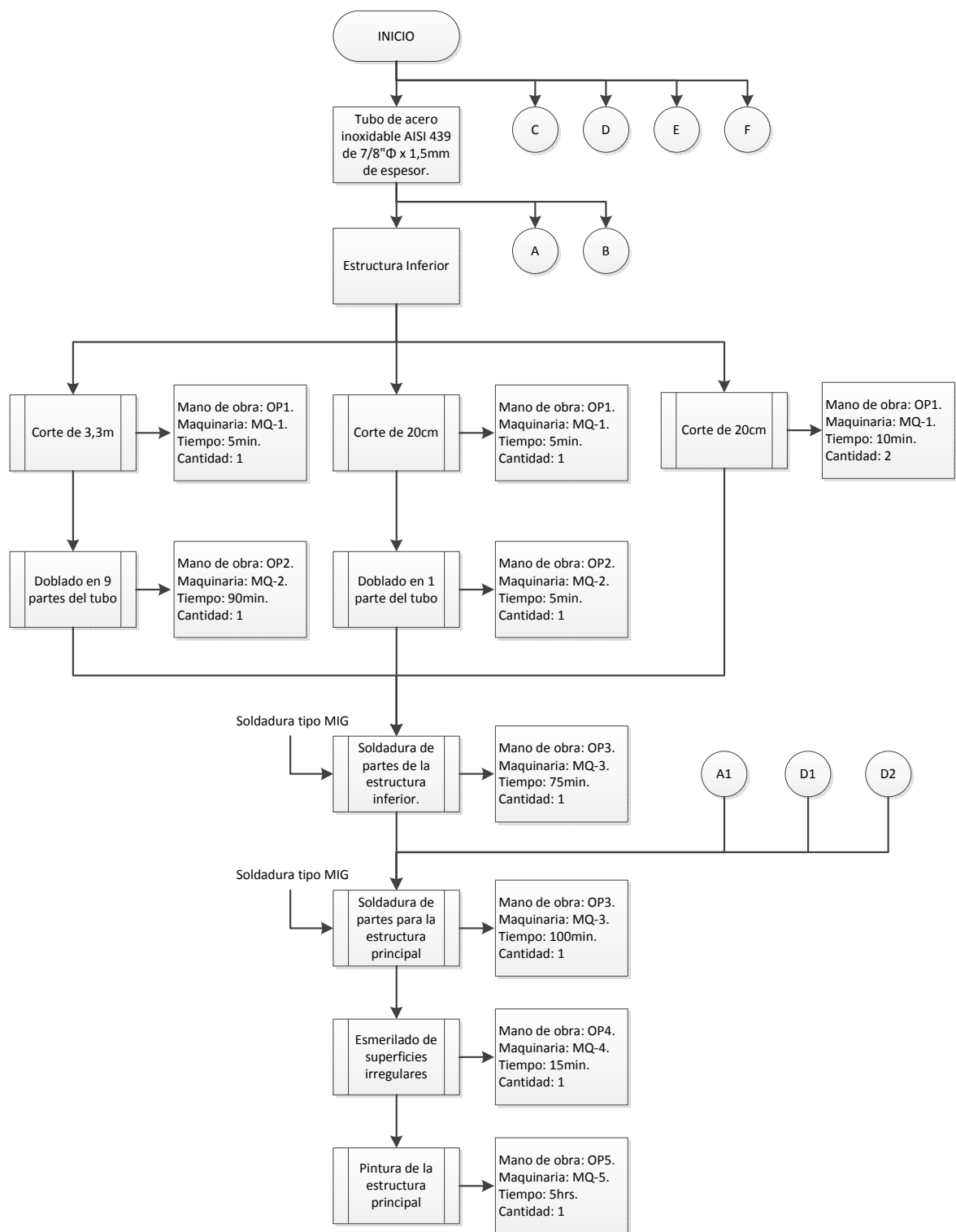


Figura 5.1 Diagrama de proceso de construcción.

FUENTE: Elaboración propia.

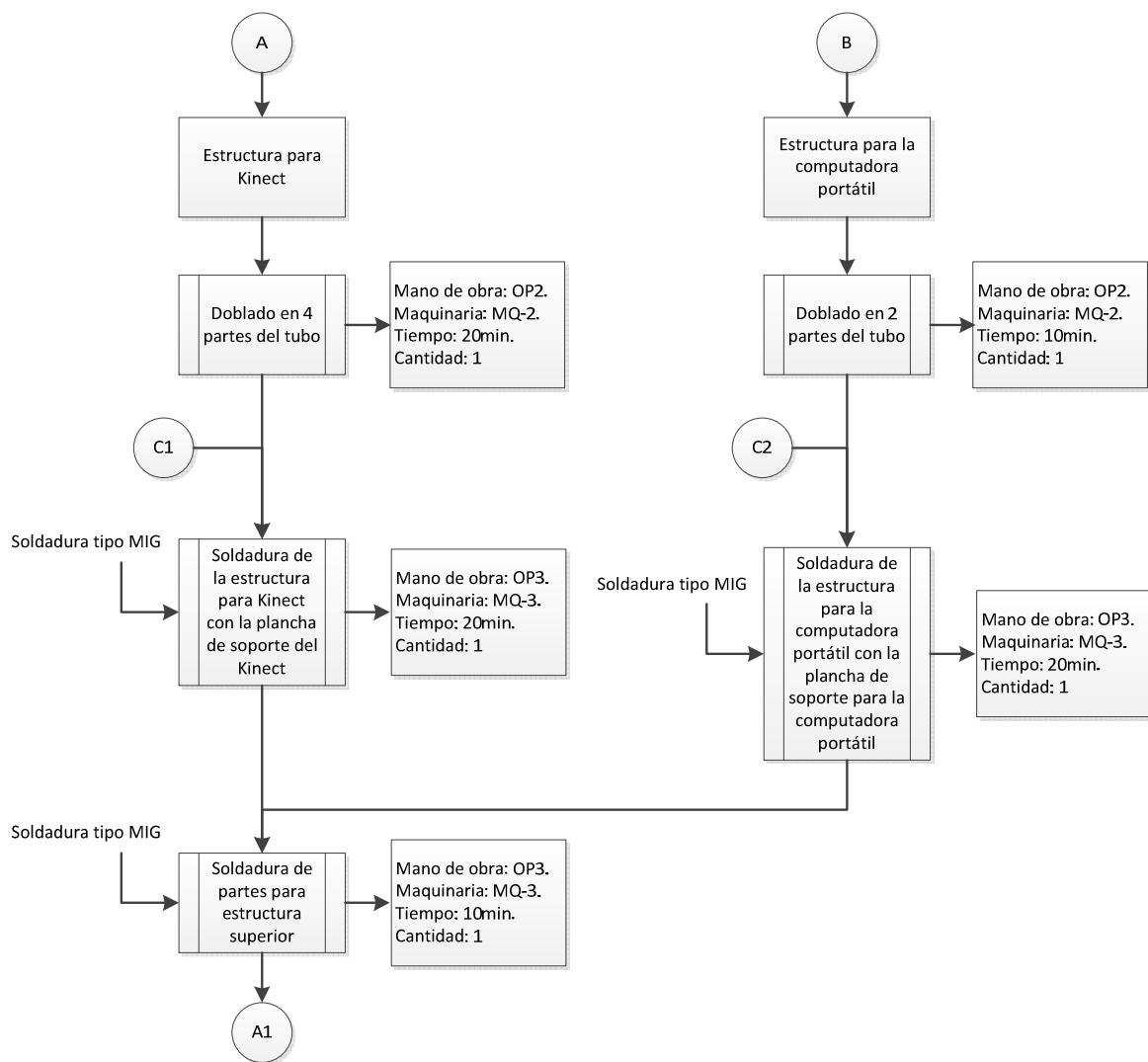


Figura 5.2 Diagrama de proceso de construcción (Continuación).

FUENTE: Elaboración propia.

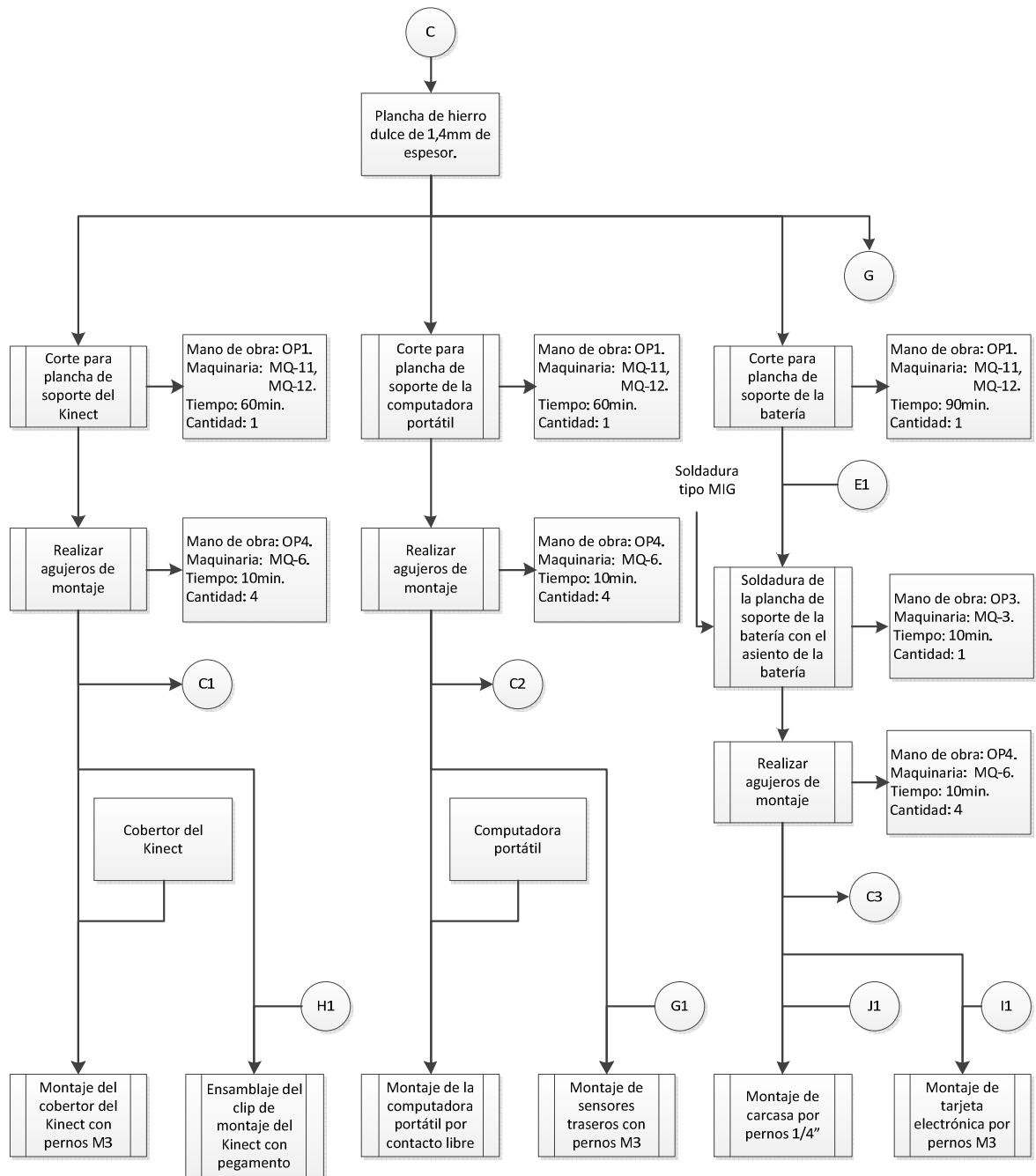


Figura 5.3 Diagrama de proceso de construcción (Continuación).

FUENTE: Elaboración propia.

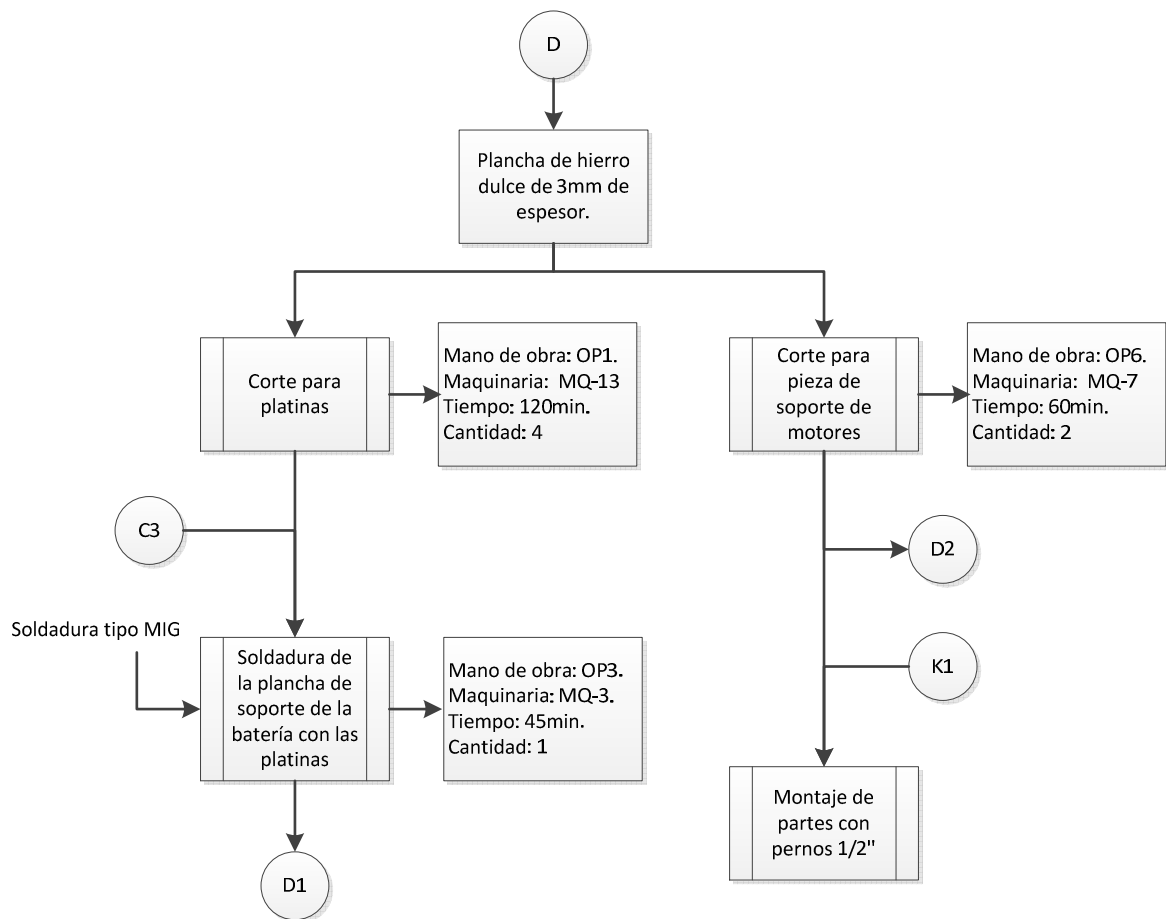


Figura 5.4 Diagrama de proceso de construcción (Continuación).

FUENTE: Elaboración propia.

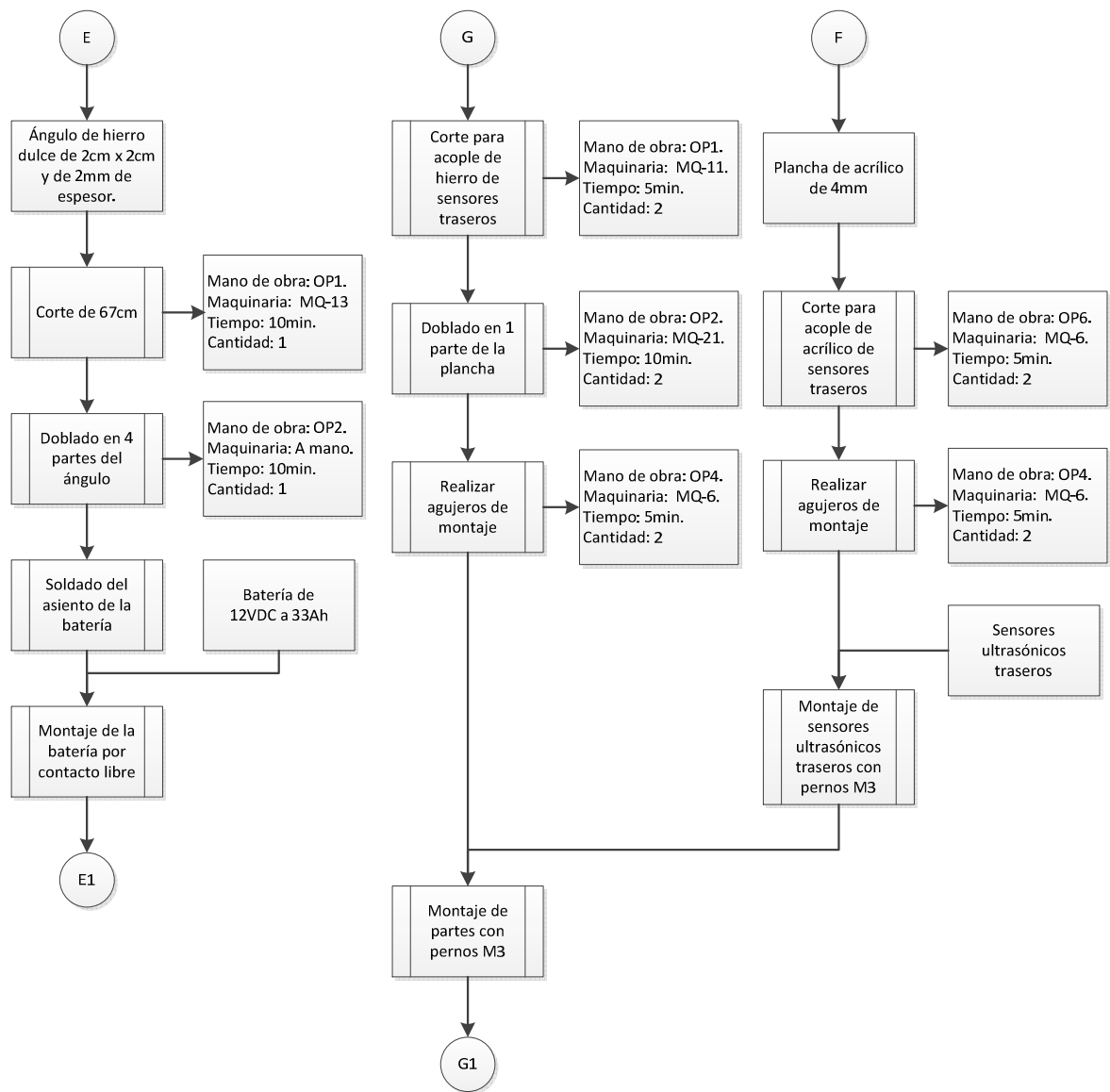


Figura 5.5 Diagrama de proceso de construcción (Continuación).

FUENTE: Elaboración propia.

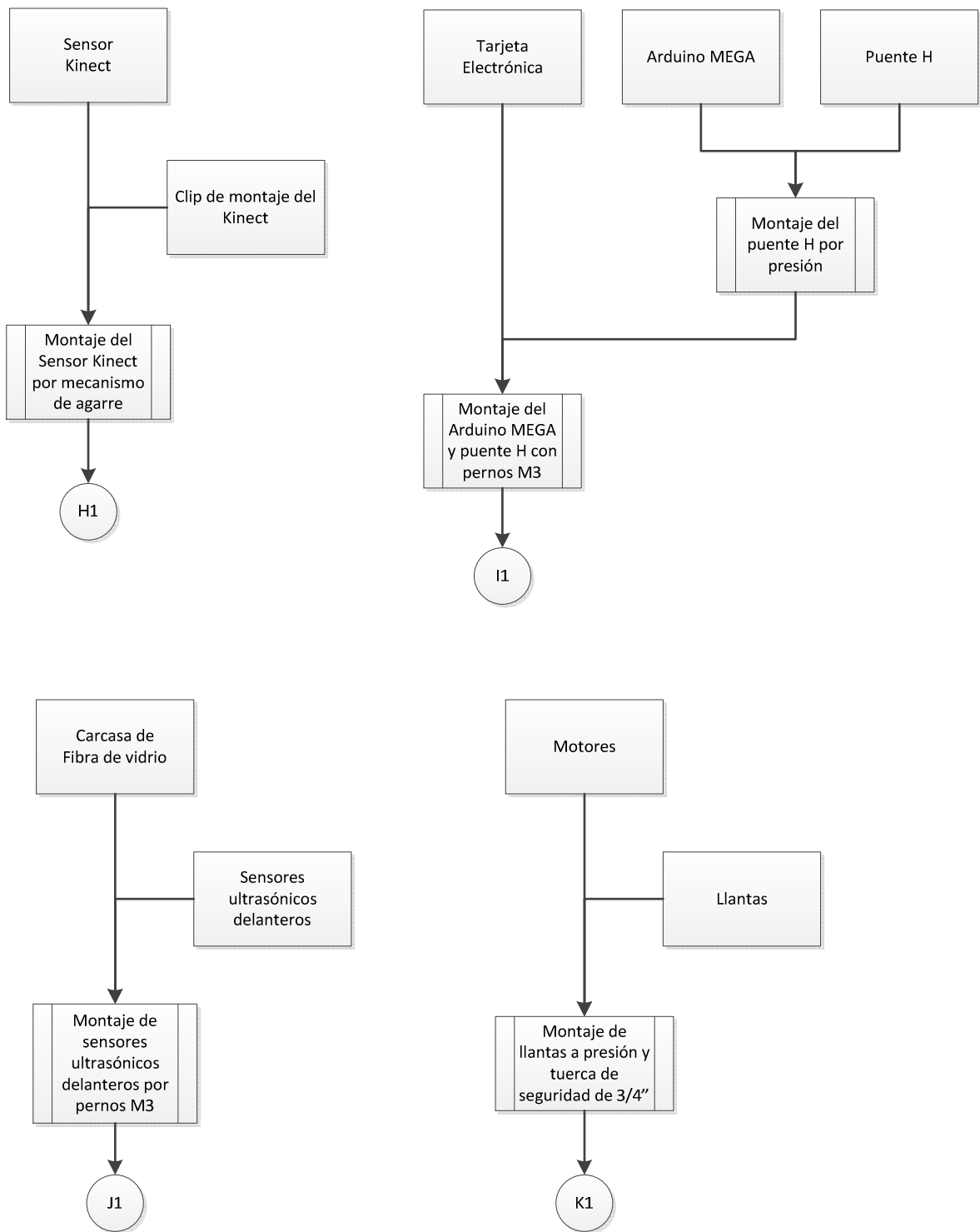


Figura 5.6 Diagrama de proceso de construcción (Continuación).

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 5.1 Leyenda del diagrama de proceso de construcción.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
OP1	Cortador
OP2	Doblador
OP3	Soldador
OP4	Maestro ayudante
OP5	Maestro pintor
OP6	Técnico en oxicorte
MQ1	Sierra eléctrica
MQ11	Cizalla
MQ12	Tijeras para metal
MQ13	Sierra manual
MQ2	Dobladora de tubos
MQ21	Dobladora de chapa metálica
MQ3	Soldadura tipo MIG
MQ4	Moladora
MQ5	Horno de pintura
MQ6	Taladro
MQ7	Oxicorte

FUENTE: Elaboración propia.

5.2 CAMBIOS REALIZADOS AL DISEÑO COMERCIAL DEL RAD4-23

Se realizaron cambios en el diseño comercial del RAD4-23 por motivos económicos y de mano de obra. Los cambios realizados son:

- Computador.
- Acople de sensores.

5.2.1 COMPUTADOR

Debido a que la compra de un Mac mini y todos los demás elementos necesarios hubiese sido fuera del presupuesto previsto, se optó por utilizar un computador ya existente para cumplir con este propósito, a continuación se analizará el computador propuesto.

5.2.1.1 Computador propuesto

En el diseño comercial el computador que se utiliza es un Mac mini el cual tiene una fuente de alimentación dada por un regulador indicado para el Mac mini, también se utiliza un parlante por donde se pueda reproducir los comandos de voz del RAD4-23. Estos tres elementos serán reemplazados por una computadora portátil que cumple con las características de software que se necesitan para poder realizar las mismas acciones que realiza el Mac mini, se utilizará una computadora portátil acer ASPIRE 4750G, con un procesador Core i7 de 2GHz, memoria RAM de 6GB y una autonomía de hora y media, (Figura 5.7 Computadora portátil acer ASPIRE.)



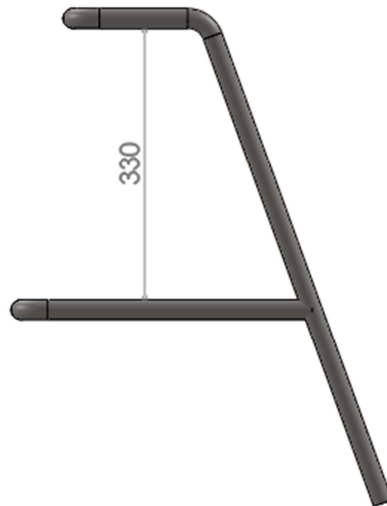
Figura 5.7 Computadora portátil acer ASPIRE.

FUENTE: acer, productos, <http://www.acer.es/ac/es/ES/content/series/aspire>, Inglés, 2013.

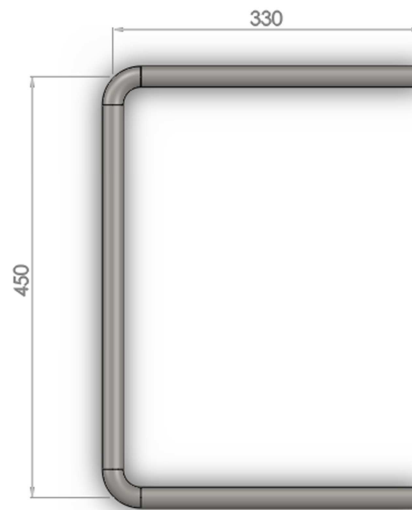
5.2.1.2 Espacio adecuado para colocar la computadora portátil

El tamaño de computadoras portátiles más común es el de 15.6" (las cuales miden 380mm x 242mm aproximadamente)⁵, por lo que se diseñó la estructura para la computadora portátil con un largo de 330mm y de ancho 450mm para que quede acorde al ancho de la estructura del Kinect de donde será sujeta a 330mm como se muestra en la Figura 5.8 Dimensiones de la estructura para la computadora portátil. (a) Vista lateral, (b) Vista superior..

⁵ Dato obtenido de la página web www.toshiba.com/computers/laptops.



(a)



(b)

Figura 5.8 Dimensiones de la estructura para la computadora portátil. (a) Vista lateral, (b) Vista superior.

FUENTE: Elaboración propia.

5.2.1.3 Estructura para la computadora portátil

En el área para la computadora portátil la estructura está sometida al peso de la computadora portátil y de la plancha. Para el cálculo de la carga en el área para el computador portátil tenemos la siguiente expresión:

$$m = m_C + m_{PC}$$

Remplazando los datos en la expresión se obtiene que:

$$m = 2.5 + 1.44$$

$$m = 3.94Kg$$

Teniendo todas las cargas a las que va a ser sometida la estructura se puede realizar esta simulación tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Material: Acero inoxidable AISI 439.
- Geometrías fijas: puntos de sujeción a la estructura para el Kinect.
- Peso de la computadora portátil y su plancha: 3.94Kg.

En la Figura 5.9 Geometrías fijas y cargas sometidas a la estructura para la computadora portátil. se muestran estas condiciones aplicadas a la estructura para el computador portátil en la simulación. Los resultados de análisis de esfuerzos se muestran en la Figura 5.10 Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura para la computadora portátil., los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 5.11 Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura para la computadora portátil. (a) Vista isométrica, (b) Vista lateral.Figura 3.15 Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura inferior.Figura 5.17, y finalmente el análisis de factor de seguridad se muestra en la Figura 5.12 Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura para la computadora portátil..

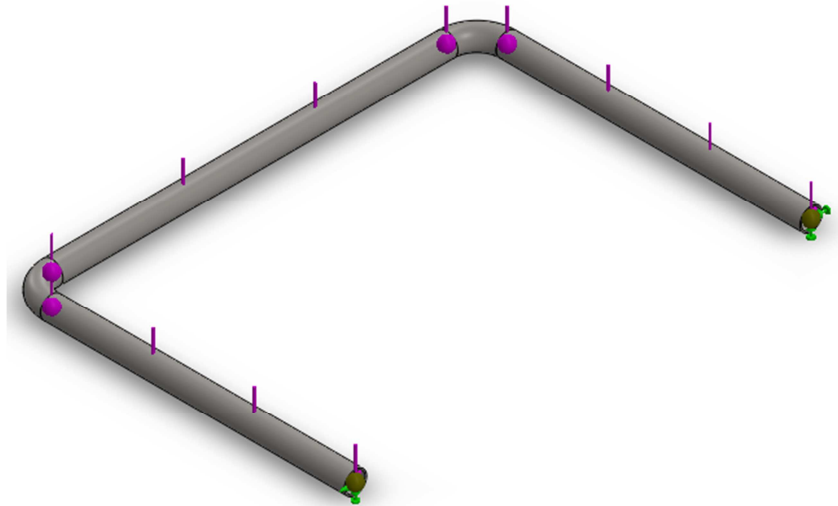


Figura 5.9 Geometrías fijas y cargas sometidas a la estructura para la computadora portátil.

FUENTE: Elaboración propia.

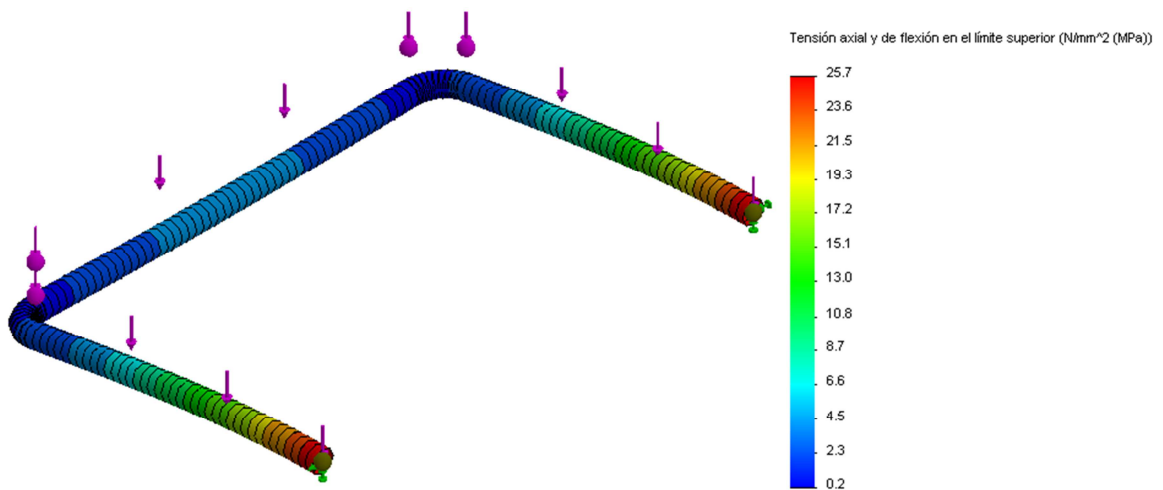
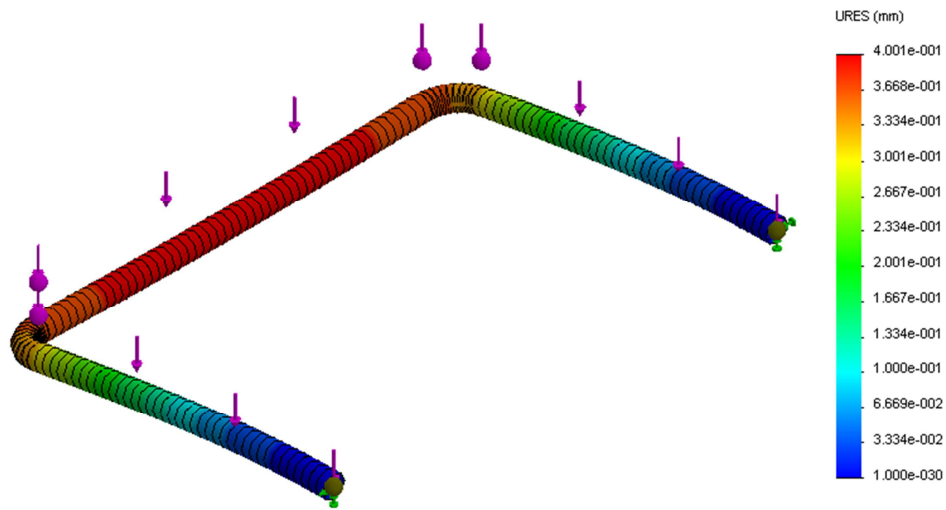
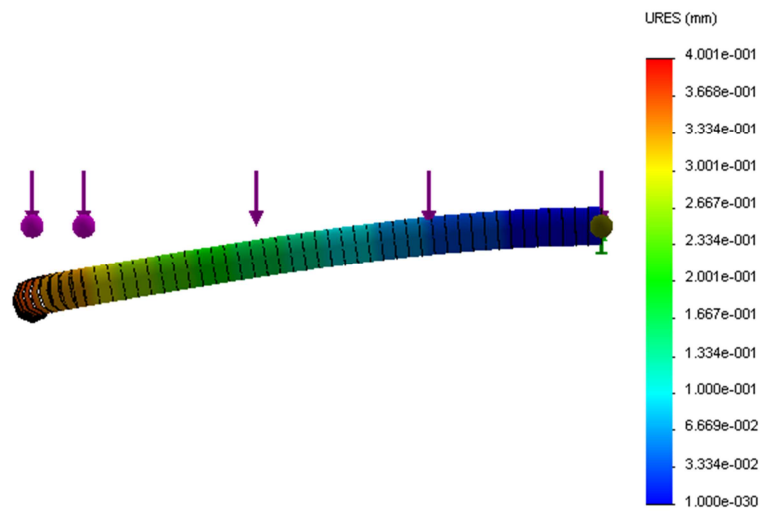


Figura 5.10 Resultado del análisis de esfuerzos de la estructura para la computadora portátil.

FUENTE: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 5.11 Resultado del análisis de desplazamientos de la estructura para la computadora portátil. (a) Vista isométrica, (b) Vista lateral.

FUENTE: Elaboración propia.

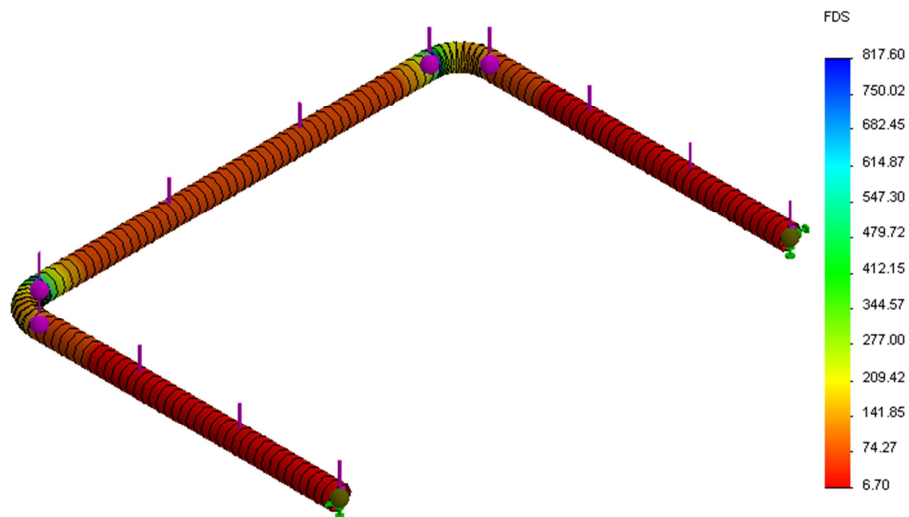


Figura 5.12 Resultado del análisis de factor de seguridad de la estructura para la computadora portátil.

FUENTE: Elaboración propia.

5.2.1.4 Plancha de soporte para computadora portátil

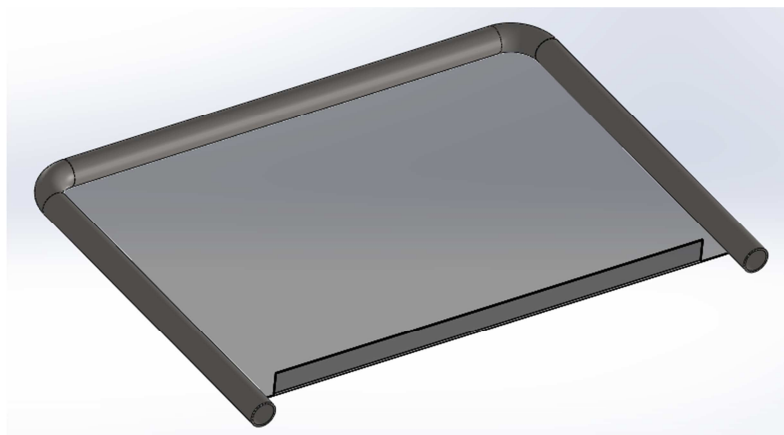
Para iniciar con este diseño es necesario considerar el peso de una computadora portátil que cumpla los requerimientos mínimos para poder manejar el dispositivo Kinect para Windows, de lo cual se hablará más adelante. El tamaño ya se especificó que será el más común de 15.6" y el espacio que tenemos en la estructura principal ya cumple con esta condición, de manera que la plancha que se colocará ocupará ese espacio. Para ello, la plancha deberá ser de 450mm x 300mm como se muestra en la Figura 5.13 Forma y dimensiones de la plancha para la computadora portátil., esta superficie es mayor a la de una portátil de 15.6".



Figura 5.13 Forma y dimensiones de la plancha para la computadora portátil.

Fuente: Elaboración propia.

Las computadoras portátiles generalmente tienen unas pequeñas patitas de caucho colocadas en la parte inferior cerca de las esquinas. Debido a la velocidad a la que se traslada el RAD4-23 y a este material, no será necesario sujetar la computadora a la plancha. Por precaución formamos una especie de bandeja para la computadora, ayudándonos del tubo de la estructura principal y añadiendo un dobléz en el extremo faltante, esto se muestra en la Figura 5.14.



**Figura 5.14 Ensamble plancha de soporte para computadora portátil-
estructura principal.**

Fuente: Elaboración propia.

El análisis que se realizará para esta plancha será solamente a través de simulación, ya que el espesor de las planchas ya fue definido en el capítulo 3.5.1.3.1.2.1, decidiendo que todas las planchas tendrán el mismo espesor. De manera que solamente será necesario comprobar si el diseño cumple con las condiciones impuestas. El peso de la computadora portátil para realizar el análisis será de 3Kg siendo este un valor para computadoras de categoría pesada, de esta manera analizamos el peor caso.

5.2.1.4.1 Simulación de esfuerzos, deformación y factor de seguridad en la plancha de soporte para computadora portátil.

Debido a que la plancha estará soldada a la estructura principal, estos extremos se consideran geometrías fijas. Para realizar esta simulación tenemos entonces las siguientes consideraciones:

- Material: Hierro gris.
- Geometrías fijas: extremos soldados a la estructura principal.
- Peso de la computadora portátil: 2.5Kg.

En la Figura 5.15 se muestran estas condiciones aplicadas en la simulación. Los resultados de análisis de esfuerzos se muestran en la Figura 5.16 y los resultados del análisis de desplazamientos se muestran en la Figura 5.17. Adicionalmente el trazado de factor de seguridad se muestra en la Figura 5.18.

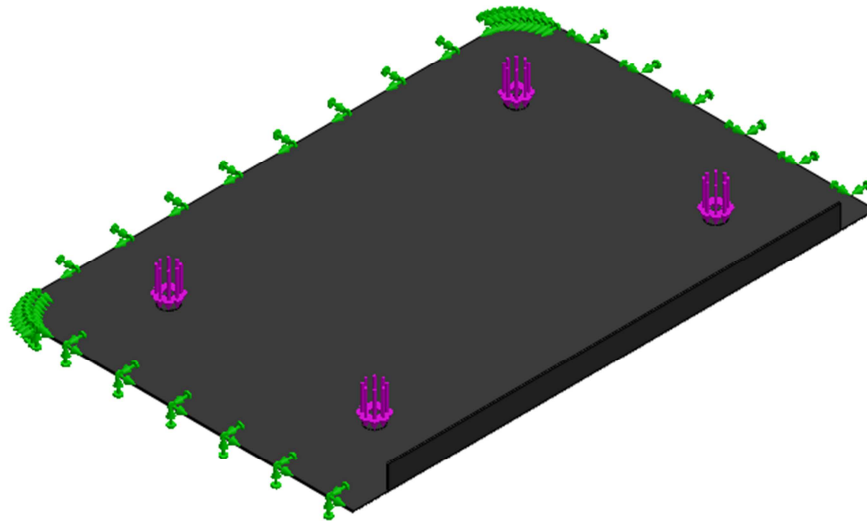


Figura 5.15 Geometrías fijas y fuerzas aplicadas en la plancha de soporte para computadora portátil.

Fuente: Elaboración propia.

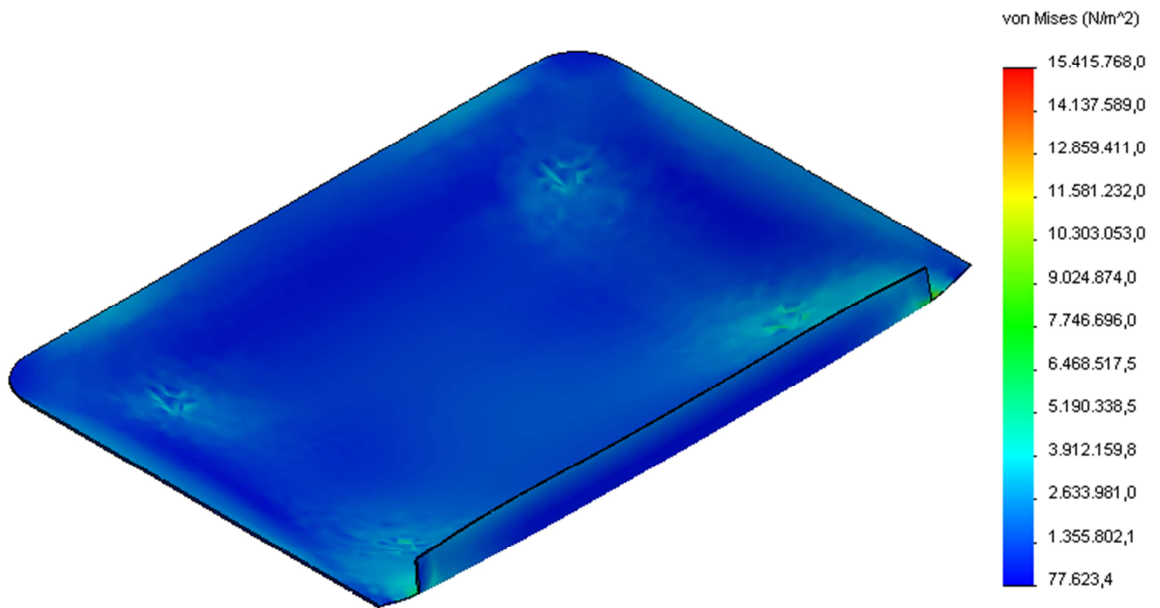
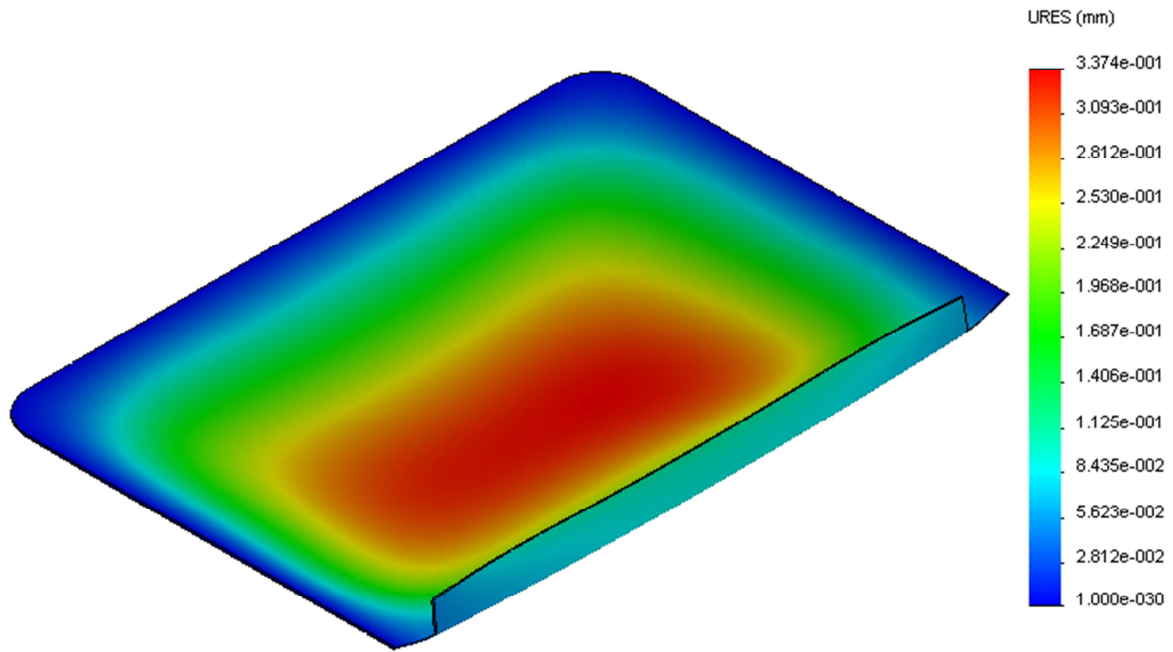
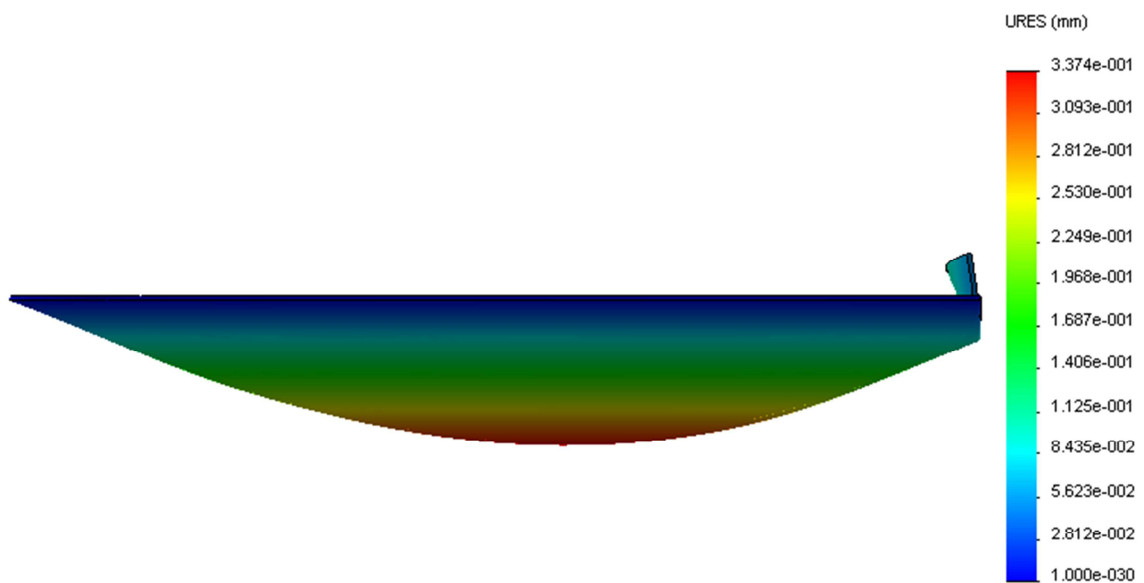


Figura 5.16 Resultados del análisis de esfuerzos en el la plancha de soporte para computadora portátil.

Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 5.17 Resultados del análisis de desplazamientos en la plancha de soporte para computadora portátil. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral.

Fuente: Elaboración propia.

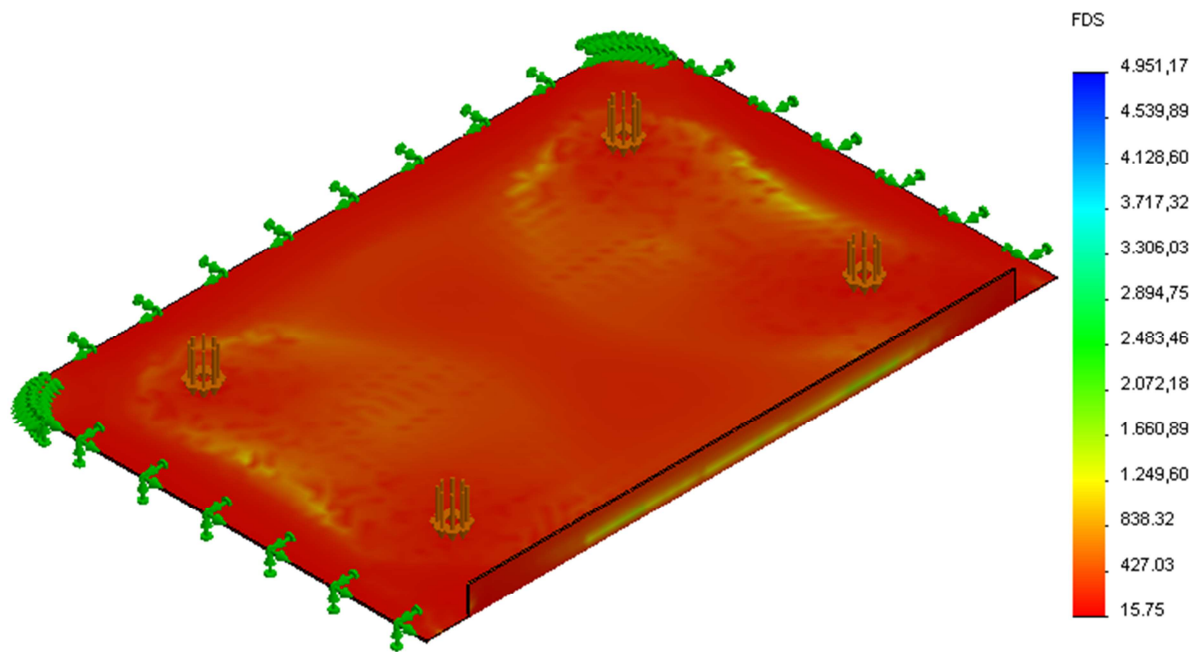


Figura 5.18 Resultados del análisis de esfuerzos en la plancha de soporte para computadora portátil.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.4.2 Interpretación de resultados obtenidos

En los resultados de los análisis de la plancha de soporte para la computadora portátil, se puede ver que la deformación máxima tiene un valor de 0.33mm lo cual es un valor casi despreciable. El factor de seguridad mínimo es de 15.75, este valor es considerablemente alto, de manera que el usar la plancha del mismo espesor que el soporte para baterías no trae ningún inconveniente, al contrario está sobredimensionado, sin embargo como se explicó en el capítulo 3.5.1.3.1.2.1, se utilizará el mismo espesor para abaratar costos.

5.2.1.5 Resultado estructura principal

Como resultado se obtiene una estructura con un extremo mayor al que se tenía anteriormente, lo cual da lugar a otros cambios que se trabajarán después.

La estructura principal para el prototipo del RAD4-23 resultante es la que se muestra en la Figura 5.19 Estructura principal resultante.

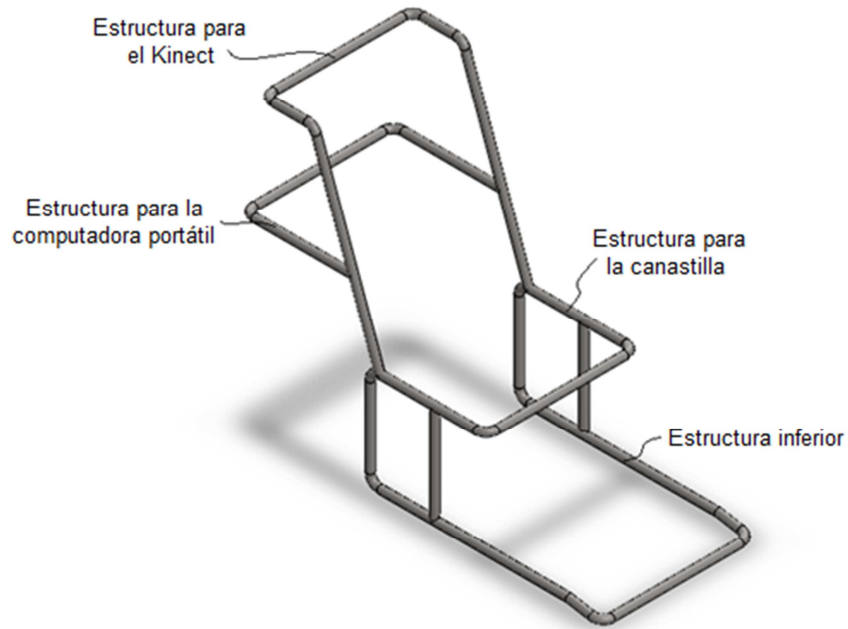


Figura 5.19 Estructura principal resultante.

FUENTE: Elaboración propia.

5.2.2 ACOUPLE DE SENSORES

Se realizaron cambios en el acople de los sensores debido a que la carcasa del RAD4-23 fue construido de tal manera que impedía a la estructura de acrílico que soportaba los sensores acoplarse a los motores como se tenía previsto. La carcasa fue realizada de esta manera debido a que no había un molde específico con la forma deseada por lo que se la mandó a construir tomando como referencia a la estructura principal del RAD4-23.

Debido a este inconveniente se optó por montar los sensores ultrasónicos en la carcasa delantera y se los fijará con pernos M3, como se muestra en la Figura 5.20.



Figura 5.20 Montaje de sensores delanteros.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3 SISTEMA MOTRIZ Y ESTRUCTURA

En este capítulo se mostrará la unión de los siguientes elementos:

- Unión del motor a la estructura.
- Unión del puente H al Arduino MEGA.
- Unión de las partes de la estructura principal.
- Unión de la llanta con el motor.

De igual manera se mostrará la conexión de los siguientes elementos:

- Conexión del motor al puente H.

5.3.1 UNIÓN DEL MOTOR A LA ESTRUCTURA

Para acoplar los motores a la estructura principal se necesitó diseñar una placa de hierro de 3mm de espesor, la cual fue cortada por oxicorte, para poder darle la forma exacta para que la placa coincidiera perfectamente con el soporte del motor. La placa se unirá a la estructura principal por medio de hilos de soldadura tipo MIG para fijarla definitivamente, los motores se unirán a la placa por medio de

tornillos con tuercas de seguridad para que a causa de la vibración no se aflojen de ninguna manera.

En el Anexo A se puede observar el ensamblaje de los motores con la placa de acople de los motores en el plano respectivo, después de trabajar con el oxicorte como resultado se obtiene la placa mostrada en la Figura 5.21 (a). Esta placa es ubicada a 5mm de la primera platina, al frente del RAD4-23, con las dos salientes de la placa hacia afuera del RAD4-23, tal como se puede observar en la Figura 5.21 (b).



(a)



(b)

Figura 5.21 Placa de acople de motores, (a) Placa de acople de motores sin ubicar. (b) Ubicación de la placa de acople de motores.

FUENTE: Elaboración propia.

Como resultado final al montar los motores con las ruedas y sujetarlas con las tuercas de seguridad obtenemos un ensamble seguro y firme al momento de someter la carga prevista.

Después de realizar el ensamble correspondiente el acople de los motores con la estructura principal resulta como se muestra en la Figura 5.22.



Figura 5.22 Resultado ensamble del acople de motores.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.2 UNIÓN DEL PUENTE H AL ARDUINO MEGA

El puente H se acopla al Arduino MEGA por medio de pines especiales que se sueldan al puente H justamente para este propósito, El acople se muestra en la Figura 5.23.

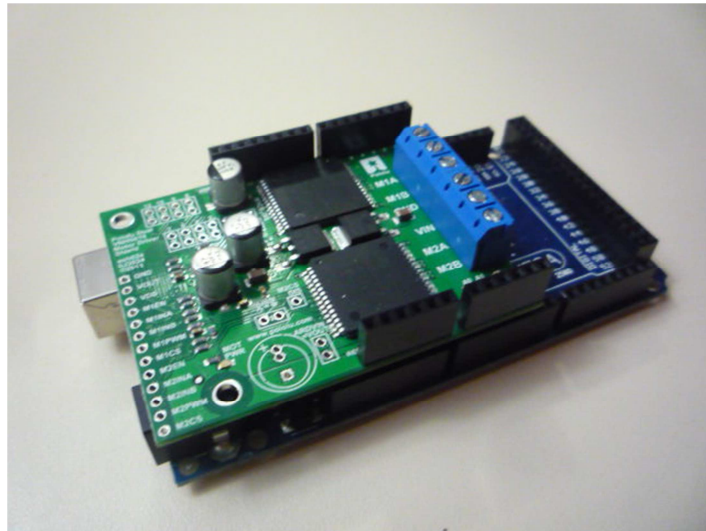


Figura 5.23 Ensamble Puente H con Arduino MEGA.

FUENTE: Elaboración propia.

Los pines del Arduino MEGA que son utilizados por el puente H y la ubicación de los pines se indican en la Figura 5.24.

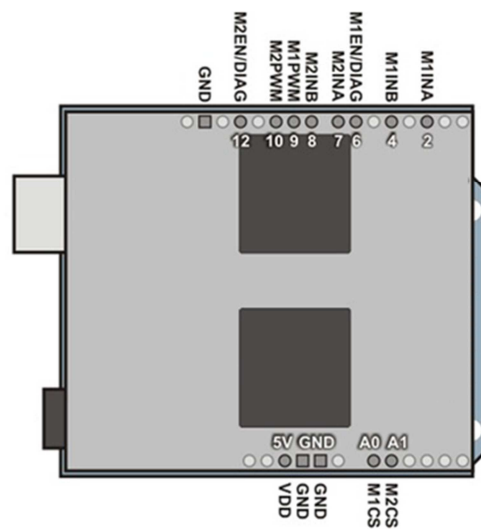


Figura 5.24 Ubicación de los pines del Puente H y Arduino MEGA.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.3 UNIÓN DE LAS PARTES DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL

Dentro de lo que es la estructura principal se tomará en cuenta los siguientes elementos:

- Estructura inferior.
- Estructura del Kinect.
- Estructura de la computadora portátil.
- Planchas y Platinas.

5.3.3.1 Estructura inferior

Se comenzó el proceso de construcción de la estructura principal por la estructura inferior, se utilizó un tubo de acero inoxidable de 7/8" de diámetro y con un espesor de 3mm, este fue doblado con un molde de curvatura de 10cm de tal manera que tome la forma deseada como se muestra en la Figura 5.25



Figura 5.25 Estructura inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.3.2 Estructura del Kinect

Luego se realizó la estructura del Kinect con el mismo arco de curvatura y con el mismo diámetro y espesor de tubo de acero inoxidable para formar la estructura que se muestra en la Figura 5.26.



Figura 5.26 Estructura del Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.3.3 Estructura de la computadora portátil

De igual manera se realizó la estructura del computador portátil con el mismo diámetro y espesor de tubo de acero inoxidable y con el mismo arco de curvatura para formar la estructura que se muestra en la Figura 5.27.



Figura 5.27 Estructura de la computadora portátil.

FUENTE: Elaboración propia.

Para terminar se unió las tres partes de la estructura principal con soldadura de tipo MIG, utilizando al helio como gas inerte. Realizando hilos de soldadura se unió la estructura del Kinect a la estructura inferior a una inclinación de 70° , igualmente fue unida la estructura para la computadora portátil a 330mm debajo de la estructura para el Kinect, como se muestra en la Figura 5.28



Figura 5.28 Estructura principal.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.3.4 Planchas y platinas

Lo primero que se realizó fue la ubicación de las platinas de cierto modo soporte las baterías, de este modo, se ubicó a una platina en cada extremo, y a partir de estas platinas se ubicaron dos más de tal forma que las dos platinas del medio soporte la carga de la batería, las platinas se ubican de a ciertas distancias como se muestra en la Figura 5.29 y se las fija con un cordón de suelda en los extremos de las platinas, donde están en contacto con el tubo de la estructura inferior.

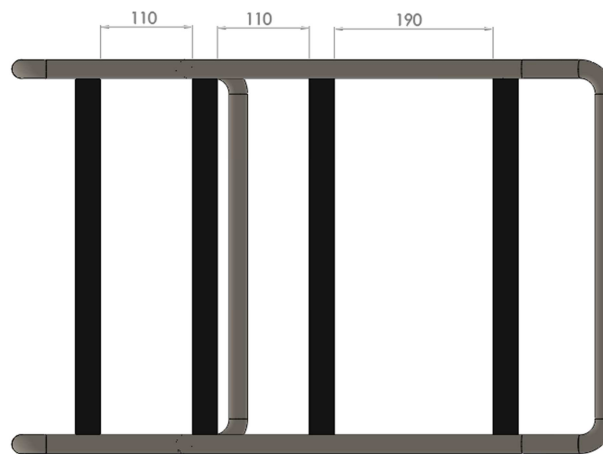


Figura 5.29 Ubicación de las platinas.

FUENTE: Elaboración propia.

Luego se ubica la plancha de hierro encima de las platinas y se realiza puntos de suelda a lo largo de las platinas donde están en contacto con la plancha como se muestra en la Figura 5.30.



Figura 5.30 Fijación de la plancha inferior.

FUENTE: Elaboración propia.

Luego se ubican las otras dos planchas, la plancha para el Kinect y la plancha para el computador portátil, se las fija de igual manera, realizando puntos de suelda alrededor de la zona de contacto entre las planchas y los tubos de las estructuras de soporte, tanto la del Kinect como la de la computadora portátil, obteniendo como resultado una estructura fija y resistente como se muestra en la Figura 5.31.



Figura 5.31 Ubicación de las planchas.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.4 UNIÓN DE LA LLANTA CON EL MOTOR

La llanta tuvo que ser mecanizada para que se acople con el eje del motor, dentro de la llanta se soldó una pieza que sirve de tope al momento de colocar la llanta en el eje, también se dejó un destaje en el centro de la llanta en donde se ubicará la chaveta para que la llanta no gire alrededor del eje y por último se aseguró la llanta con una tuerca de seguridad, para que no se destornille la tuerca a causa de vibraciones, el acople de la llanta al motor se muestra en la Figura 5.32.



(a)



(b)

Figura 5.32 Unión de llanta con el motor. (a) Vista superior. (b) Vista frontal.

FUENTE: Elaboración propia.

5.3.5 CONEXIÓN DEL MOTOR AL PUNTE H

El cable rojo del motor izquierdo se conecta a la bornera M1A, el cable negro del motor izquierdo se conecta a la bornera M2A, el cable rojo del motor derecho se conecta a la bornera M1B y el cable negro del motor derecho se conecta a la bornera M2B, la conexión de los motores al puente H se muestran en la Figura 5.33.

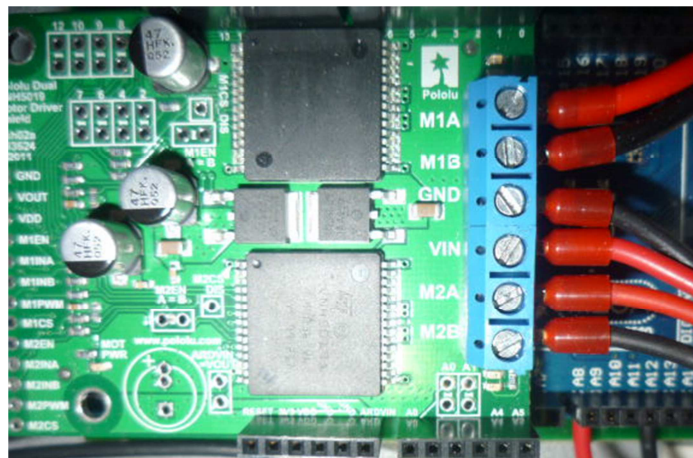


Figura 5.33 Conexión del motor al puente H.

FUENTE: Elaboración propia.

El esquema de la conexión se muestra en la siguiente Figura 5.34.

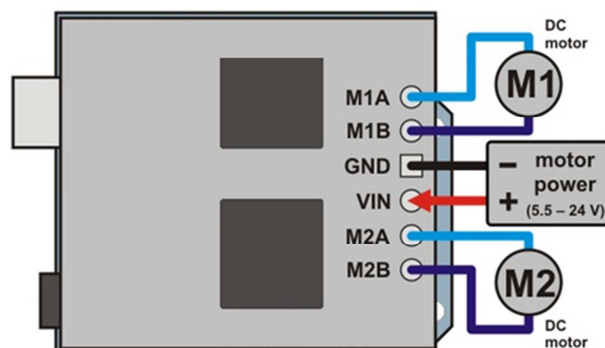


Figura 5.34 Esquema de conexión del motor al puente H.

FUENTE: Elaboración propia.

5.4 SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL

En este capítulo se mostrará la unión de los siguientes elementos:

- Unión del Kinect con la plancha.
- Unión del cobertor del Kinect a la plancha.
- Unión del Arduino MEGA a la placa electrónica.

De igual manera se mostrará la conexión de los siguientes elementos:

- Conexión del Kinect y el Arduino MEGA al computador.

5.4.1 UNIÓN DEL KINECT CON LA PLANCHA

El Kinect está unido a la plancha de soporte por medio de un clip de montaje que agarra la base del Kinect con unas agarraderas que entran en unos orificios y por medio de un sistema de resortes se abren impidiendo que el Kinect se mueva, para desmontar el Kinect basta únicamente con presionar a la vez dos botones ubicados a los costados del clip de montaje para que las agarraderas dejen en libertad a la base del Kinect, como se muestra en la Figura 5.35.



Figura 5.35 Sistema de agarre del clip de montaje al Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

El montaje del Kinect a la plancha se indica en la Figura 5.36.



Figura 5.36 Unión del Kinect a la plancha.

FUENTE: Elaboración propia.

5.4.2 UNIÓN DEL COBERTOR DEL KINECT A LA PLANCHA

Este dispositivo es muy delicado al contacto, debido a su mecanismo, por lo que se protege a este elemento con cobertor de acrílico que se ubica en la plancha de soporte del Kinect como se muestra en la Figura 5.37.



Figura 5.37 Unión del cobertor del Kinect a la plancha.

FUENTE: Elaboración propia.

5.4.3 UNIÓN DEL ARDUINO MEGA AL PLACA ELECTRÓNICA

El Arduino MEGA se une a la placa electrónica por medio de separadores que se ubican en la placa electrónica y se fijan a esta de un lado con pernos M3 y de igual manera al otro lado se adhieren al Arduino MEGA por pernos M3 como se muestra en la Figura 5.38.

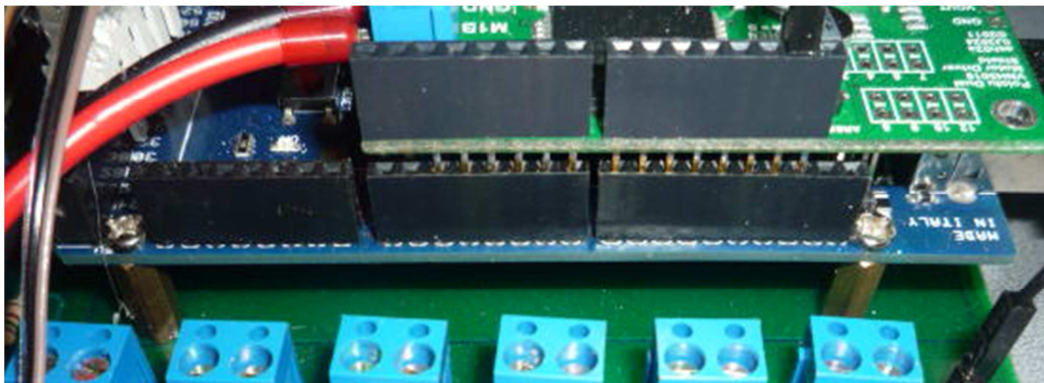


Figura 5.38 Unión del Arduino MEGA a la placa electrónica.

FUENTE: Elaboración propia.

5.4.4 CONEXIÓN DEL KINECT Y DEL ARDUINO MEGA AL COMPUTADOR

La conexión de estos dos elementos se realiza por medio de cables USB que van directamente de un elemento a otro, debido a que el computador posee dos puertos USB 2.0 de entrada no hay problema alguno, cabe recalcar que el dispositivo Kinect no permite el uso de ningún tipo de HUBs, por lo que es necesario que el computador tenga dos puertos USB 2.0 de entrada, uno para conectar el Kinect y otro para conectar el Arduino MEGA.

5.5 SISTEMA DE DETECCIÓN

En este capítulo se mostrará la unión de los siguientes elementos:

- Unión de los sensores traseros a la plancha.

De igual manera se mostrará la conexión de los siguientes elementos:

- Conexión de los sensores al Arduino MEGA.

5.5.1 UNIÓN DE LOS SENSORES TRASEROS A LA PLANCHA

Para los sensores traseros se construyeron dos piezas, se construyó un ángulo de hierro para poder fijar el sensor a la plancha de soporte de la computadora portátil, y se construyó una placa de acrílico de 3mm de espesor para poder fijar el sensor a la placa de acrílico y esta a su vez al ángulo de hierro, tal como se muestra en la Figura 5.39.



Figura 5.39 Unión de los sensores traseros a la plancha.

FUENTE: Elaboración propia.

5.5.2 CONEXIÓN DE LOS SENSORES AL ARDUINO MEGA

Se conectan las señales de los sensores 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en los pines 24-22, 28-26, 34-32, 40-38, 46-44 y 52-50, correspondientemente, siendo los cables cafés señal de Trigger de los sensores y los cables negros señal de Echo de los sensores, tal como se muestra en la Figura 5.40.

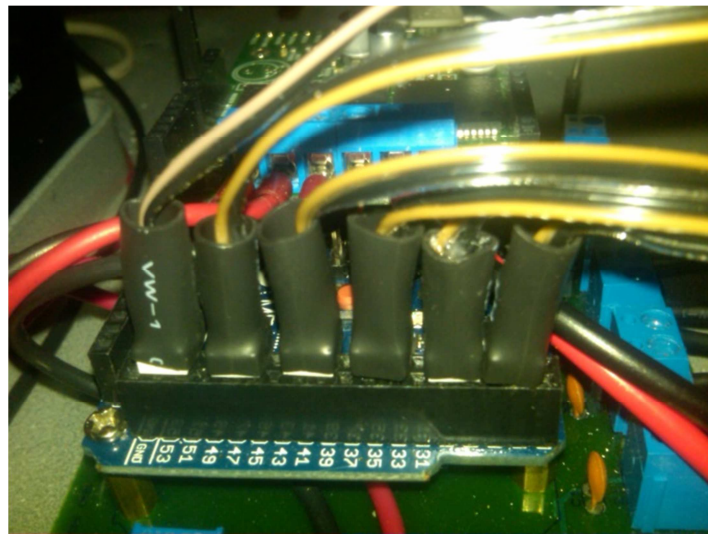


Figura 5.40 Conexión de los sensores al Arduino MEGA.

FUENTE: Elaboración propia.

Para facilidad de desmontaje de los sensores se realizaron conectores a 20cm del sensor como se muestra en la Figura 5.41, de esta manera los sensores pueden ser cambiados sin destruir o reemplazar la totalidad del cable, en el caso de los sensores delanteros también van a servir de seguridad al momento de retirar la tapa delantera del RAD4-23, si la tapa es retirada demasiada distancia los conectores vendrán a desconectarse, evitando ruptura del cable o daños en la placa eléctrica.

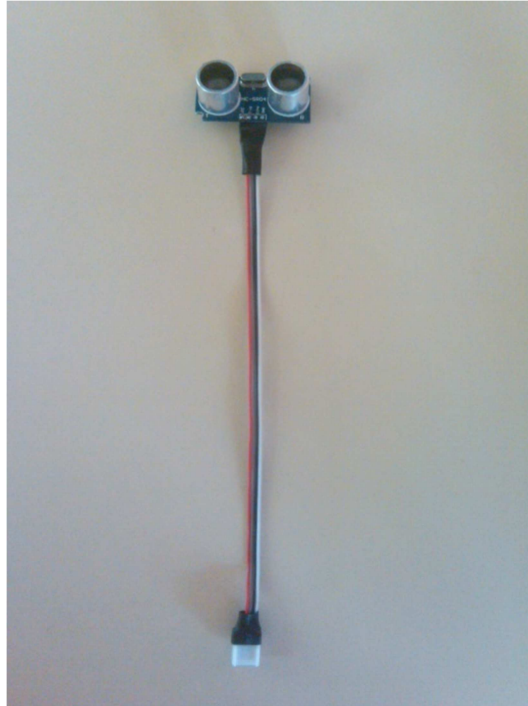


Figura 5.41 Conector de sensor para desmontaje.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

En este capítulo se mostrará la unión de los siguientes elementos:

- Unión de la batería a la plancha.
- Unión de la placa electrónica a la plancha.

De igual manera se mostrará la conexión de los siguientes elementos:

- Conexiones de fuentes.

5.6.1 UNIÓN DE LA BATERÍA A LA PLANCHA

La batería irá sobrepuesta en un asiento de hierro hecho de la misma medida para que la batería quede fija, El asiento de hierro esta soldado a la

plancha inferior para dar más seguridad a la batería, tal como se muestra en la Figura 5.42.

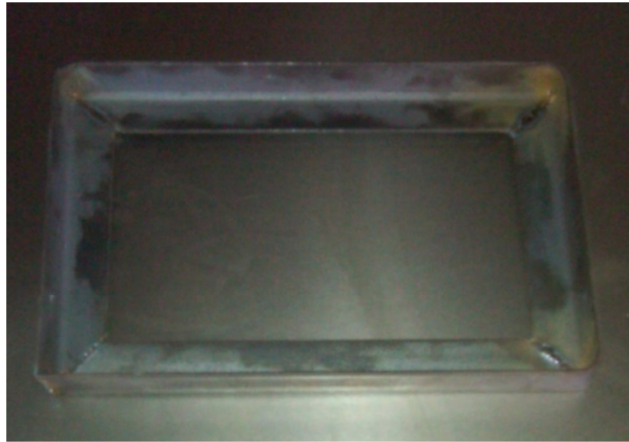


Figura 5.42 Unión de la batería a la plancha.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6.2 UNIÓN DE LA PLACA ELECTRÓNICA A LA PLANCHA

La placa electrónica se une con la plancha inferior de la misma forma que el Arduino MEGA se unió a la placa electrónica. La unión se realizó con separadores de 10mm de altura ajustados con pernos M3 tanto por el un lado para sujetar los espaciadores a la plancha inferior y por el otro lado para sujetar la placa electrónica a los espaciadores, de esta manera se obtiene un montaje seguro para la placa electrónica. La unión de la placa electrónica a la plancha se muestra en la Figura 5.43.



Figura 5.43 Unión de la placa electrónica a la plancha.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6.3 CONEXIÓN DE FUENTES

La placa electrónica (Figura 5.44) es la encargada de acondicionar y dividir los diferentes tipos de fuentes para los siguientes elementos:

- Alimentación de los motores.
- Alimentación del Kinect.
- Alimentación de los sensores.

Cabe resaltar que la computadora portátil tiene su propia batería, y que esta también alimentará por medio del cable USB al arduino MEGA.

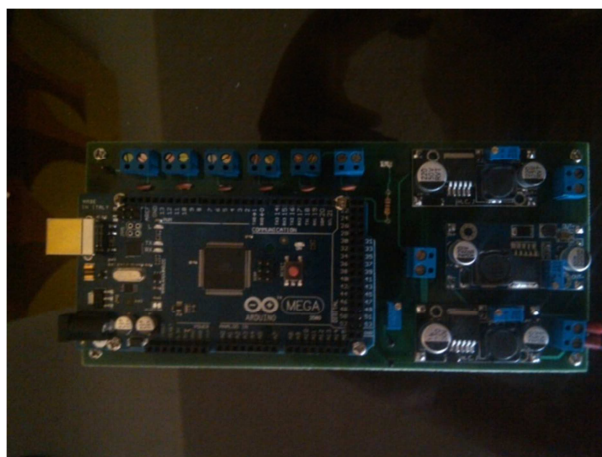


Figura 5.44 Placa electrónica.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6.3.1 Alimentación de los motores

La fuente para los motores se conecta de las borneras de la placa electrónica a las borneras GND y VIN del puente H, siendo el cable rojo el positivo y el cable negro tierra como se muestra en la Figura 5.45. El puente H únicamente re direcciona la alimentación de los motores dependiendo de las entradas digitales que recibe.

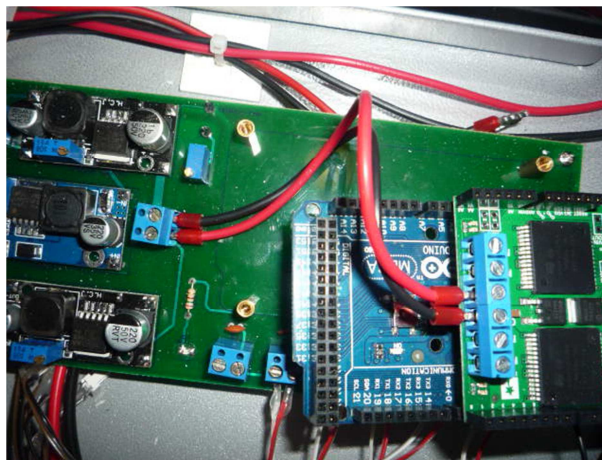


Figura 5.45 Alimentación de los motores.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6.3.2 Alimentación del sensor Kinect

El dispositivo Kinect tiene dos cables, el un cable es para alimentación por lo que va a ir conectado a la placa electrónica en las borneras de Kinect, siendo el cable café positivo y el cable blanco tierra, como se indican en la Figura 5.46. El segundo cable es un cable USB el cual es conectado directamente al computador.

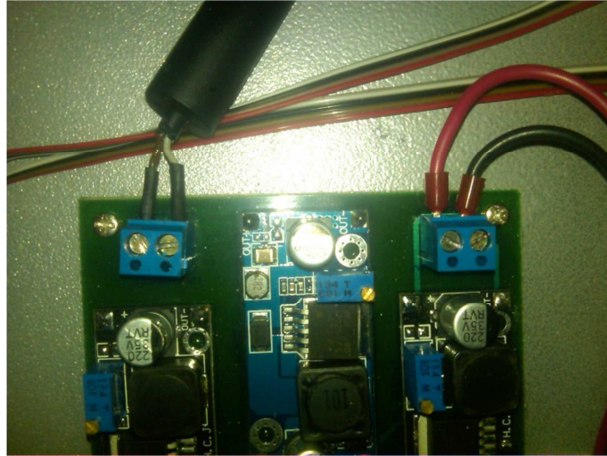


Figura 5.46 Alimentación del sensor Kinect.

FUENTE: Elaboración propia.

5.6.3.3 Alimentación de los sensores

Los sensores ultrasónicos HCR-S04 tienen cuatro pines, VCC, Trigger, Echo y GND, como se mencionó en el capítulo 5.5.2, Trigger y Echo se conectan al Arduino MEGA. VCC y GND se conectan a las borneras S1, S2, S3, S4, S5 y S6 de la placa electrónica, siendo el cable rojo para VCC y el cable blanco para GND, tal como se indica en la Figura 5.47 Alimentación de los sensores.

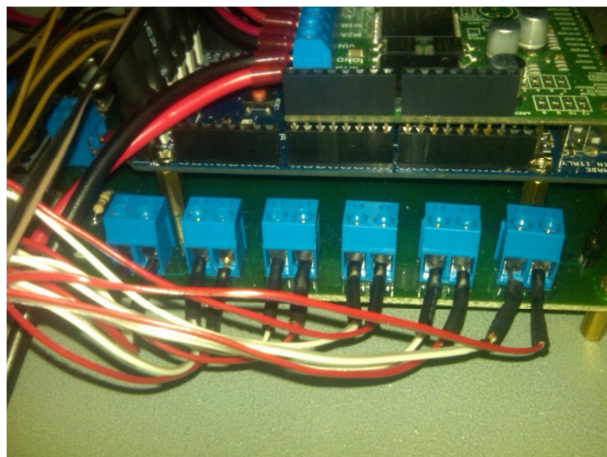


Figura 5.47 Alimentación de los sensores.

FUENTE: Elaboración propia.

5.7 RESULTADO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL RAD4-23

En este capítulo se muestra fotos del resultado final de la construcción del RAD4-23. En la Figura 5.48 se muestra una foto del RAD4-23 con carcasa y sin carcasa.



(a)



(b)

Figura 5.48 RAD4-23 construido. (a) Con la carcasa. (b) Sin la carcasa.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 5.49 tenemos una vista superior de la parte inferior del RAD4-23 donde se nota la ubicación de todos los elementos sobre la plancha de soporte de la batería.



Figura 5.49 Plancha inferior con todos los elementos del RAD4-23 construido.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 5.50 se muestra una vista lateral y una vista frontal de RAD4-23 construido.



(a)



(b)

Figura 5.50 Vistas lateral y frontal del RAD4-23 construido. (a) Vista lateral.

(b) Vista frontal

FUENTE: Elaboración propia.

CAPITULO 6

PROGRAMACIÓN

En este capítulo se detalla la programación realizada para el funcionamiento del RAD4-23, la cual se la divide en 2 partes:

- Diseño del programa.
- Desarrollo del programa para funcionamiento del RAD4-23.

6.1 DISEÑO DEL PROGRAMA

El diseño del programa se lo divide en tres partes:

- Análisis del problema.
- Arquitectura del programa.
- Estructura del programa.

Se inicia con el análisis del problema ya que es necesario primero conocer el problema para dar una solución al mismo, para ello se debe considerar todas las condiciones existentes para el funcionamiento del robot.

6.1.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El robot RAD4-23 como tal tiene como objetivo principal del cual ya se ha hablado con anterioridad, seguir al usuario mientras este realiza con normalidad actividades dentro de un supermercado.

Para lograr este objetivo se decide utilizar el sensor Kinect tal como se trató en el capítulo 4 del sistema de visión artificial. De manera que el programa a desarrollar debe primeramente obtener los datos del sensor Kinect, a continuación

debe evaluar la posición del usuario y según estos datos toma las decisiones de movimiento de los motores.

Existen ciertos requerimientos adicionales para un funcionamiento correcto del robot, los cuales se tratan en la siguiente sección. Estos requerimientos se deben tomar en cuenta durante el desarrollo del programa para que los algoritmos utilizados satisfagan todas las condiciones existentes.

6.1.1.1 Requerimientos de funcionamiento del RAD4-23

Para cumplir con el objetivo principal del robot existen algunos requerimientos, no solo para cumplir su función sino también para que el usuario pueda hacer uso del robot sin dificultad. Además existen condiciones que el robot debe poder identificar para que tenga un funcionamiento apropiado o para cumplir con algunos de estos requerimientos. En este capítulo se detallan estos requerimientos y condiciones, además de explicar cómo se lograrán estos requerimientos.

Los requerimientos generales de todo el robot están indicados en el capítulo 2.2.2.4, los cuales se muestran en la Tabla 2.6, donde los que definen el funcionamiento del RAD4-23 son:

- Seguro.
- Fácil de usar.
- Distancia de seguimiento entre el usuario y el robot de 60cm.
- No seguir a otra persona mientras se encuentra en funcionamiento con el usuario.
- Comandos de voz para activación y desactivación del seguimiento.
- Al curvar evitar colisiones con las estanterías.

Estos requerimientos deben ser tomados en cuenta al momento de programar el seguimiento del RAD4-23. Para cumplirlos a continuación se muestra las soluciones o condiciones propuestas (Los comandos de voz son parte del requerimiento de ser fácil de usar).

6.1.1.1.1 Seguro

Para lograr seguridad del usuario se busca evitar colisiones entre el usuario y el robot y también evitar colisiones con objetos que puedan existir entre el usuario y el robot. Este requerimiento fue tomado en cuenta como parte del diseño del robot, para ello además de utilizar el sensor Kinect para conocer la posición exacta del usuario, también se agregaron sensores en la parte delantera del RAD4-23 como parte del sistema de detección tratado en el capítulo 3.4.3. De manera que los sensores tendrían dos funciones:

- Evitar colisionar con el usuario.
- Detectar objetos entre el usuario y el robot mientras se realiza el seguimiento.

6.1.1.1.1.1 Evitar colisionar con el usuario

Se debe tomar en cuenta una situación especial dentro de nuestro sistema de visión artificial, la cual tiene que ver con la posición del usuario. El sensor Kinect no nos permite reconocer si el usuario está de frente o de espaldas, de manera que tenemos una condición especial debido a que cuando el usuario está de frente al robot sus piernas están más cerca del robot que el centro de sus hombros que es la articulación que se va a seguir. Por esta razón existe la posibilidad de que cuando el usuario este de frente el robot pueda colisionar con el usuario. En este caso los sensores delanteros nos permitirán saber si existe algún “objeto” cerca al RAD4-23 en este caso los pies del usuario o los asientos para pies de la silla de ruedas. Conociendo esto el robot no debe avanzar.

6.1.1.1.2 Detectar objetos entre el usuario y el robot mientras se realiza el seguimiento

Al contrario que en el caso anterior donde el usuario está de frente al Kinect, cuando el usuario está de espaldas no podrá percatarse si existe un objeto cualquiera entre él y el robot. Los sensores delanteros entonces nos darán la señal en caso de que mientras el robot avanza exista un objeto en frente.

6.1.1.1.2 Fácil de usar

El robot como tal debe ser sencillo de utilizar, para cumplir con ello el funcionamiento esté basado en comandos de voz. Se buscó entonces que existan solamente dos comandos que el usuario utilizará para hacer funcionar el robot, uno para iniciar el sistema de seguimiento y otro para terminarlo.

Cuando el programa esté corriendo, el robot emitirá comandos de voz para dar conocimiento al usuario de la condición actual del sistema o si existe posibilidad de colisión. El usuario entonces podrá iniciar el sistema al responder con otro comando de voz, este comando es utilizado también para continuar el sistema en caso de que una posible colisión con un objeto en frente del robot haya sido detectada.

Si el usuario desea que el RAD4-23 lo espere en algún lugar solo deberá utilizar el comando de voz para terminar y el robot esperará nuevamente el comando de inicialización para continuar. De igual manera si el usuario ya no desea utilizar el robot solo utilizará este comando para que el robot se detenga.

6.1.1.1.3 Distancia de seguimiento entre el usuario y el robot de 60cm

Este requerimiento es logrado a través del sensor Kinect, ya que este nos indicará la distancia a la que se encuentra el usuario del robot. Si tomamos en cuenta que el sensor Kinect está ubicado en la parte trasera del RAD4-23 y que el

largo del robot es de un metro, entonces la distancia que debe existir entre el usuario y el sensor Kinect debe ser de 1.6 metros para que el robot se encuentre a 60cm del usuario. Es necesario recalcar que estamos hablando de la distancia cuando el usuario se mueve hacia adelante en línea recta. Si el usuario se detiene y regresa para depositar algo en la canastilla el robot no retrocederá sino que se quedará inmóvil. Existe otra condición cuando el usuario está cerca del robot y realiza un giro, en este caso el robot solamente girará para seguir la trayectoria de giro del usuario.

6.1.1.1.4 No seguir a otra persona mientras se encuentra en funcionamiento con el usuario

Uno de los puntos más importantes durante el funcionamiento del RAD4-23 es que este no siga a otra persona mientras sigue al usuario. En el ambiente dentro de un supermercado habrá personas en los alrededores del usuario, y puede existir la posibilidad de que el sensor Kinect reconozca a estas personas. Es importante entonces que aunque el sensor Kinect reconozca a estas personas no las confunda con el usuario. Si llega a existir la posibilidad de una confusión por parte del sensor Kinect, el programa se detendrá y esperara que el usuario inicie el seguimiento nuevamente.

En el caso crítico de que una persona se cruce entre el usuario y el robot, el robot también se detendrá y comunicará al usuario que espere y vuelva a iniciar el sistema.

6.1.1.1.5 Al curvar evitar colisiones con las estanterías

Cuando el usuario se mueve dentro de dos perchas puede existir la posibilidad que por giros del usuario, la parte trasera del robot se acerque demasiado a las estanterías, en este caso el robot debe tomar acciones para evitar colisiones. Esto también ocurre cuando el usuario entra entre dos perchas o sale de las mismas.

Para evitar que el robot colisione, en el sistema de detección tratado en el capítulo 3.4.3, también se agregó sensores traseros que nos permiten saber si la parte trasera del RAD4-23 se acerca demasiado a las estanterías durante un giro. Esto también nos ayuda a evitar colisiones con otras personas al momento de girar.

6.1.2 ARQUITECTURA DEL PROGRAMA

Para la representación de la arquitectura del programa se decide utilizar una arquitectura estratificada, en la cual se crean diferentes capas y cada una realiza operaciones que progresivamente se aproximan más al cuadro de instrucciones de máquina, donde:

- La capa externa tiene los componentes que sirven a las operaciones de interfaz de usuario.
- La capa intermedia proporcionan servicios de utilidad y funciones de software de aplicaciones.
- La capa interna tiene los componentes que realizan operaciones de interfaz de sistema.

La arquitectura planteada para nuestro programa se muestra en la Figura 6.1.

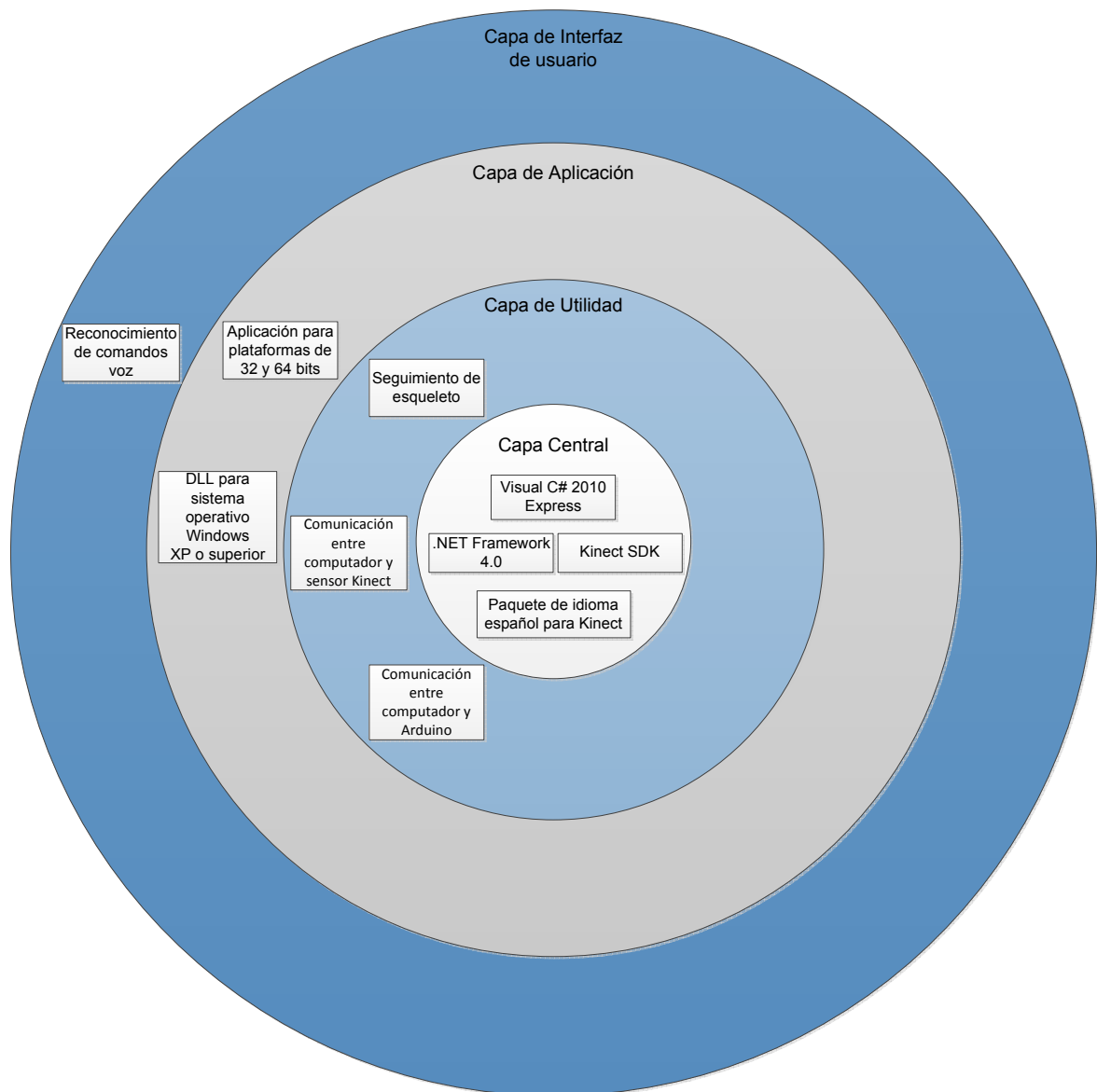


Figura 6.1 Arquitectura del programa.

FUENTE: Elaboración propia.

6.1.3 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa de funcionamiento del RAD4-23 se desarrolló en lenguaje C# utilizando Microsoft Visual C# 2010 Express y se utilizaron diferentes herramientas de desarrollo del sensor Kinect como se indicó en el capítulo 0. Además también se mencionó que las funciones del sensor Kinect y la comunicación serial se manejaron a través de eventos.

La clase principal del programa es *MainWindow* debido a que dentro de esta se declaran todos los objetos y además se ejecutan los eventos de los métodos. En esta clase tenemos las funciones que inician y configuran los componentes, realizan la adquisición de datos, toman la decisión de movimientos y detiene los componentes.

La clase *KinectSensor* es la que contiene las propiedades del sensor Kinect y sus configuraciones, además de los métodos para iniciar y terminar el sensor. Esta clase a su vez posee objetos que sirven para manejar las diferentes funciones del sensor Kinect, los cuales son: *Skeleton*, *DepthStream*, *ColorStream*, *SkeletonStream* y *DepthImageFrame*. Todas estas clases son parte de las librerías de desarrollo de Kinect (Kinect SDK).

La clase *SerialPort* maneja el puerto serial que se desea utilizar. Dentro de la misma se selecciona el puerto a utilizar y se configuran los parámetros de la comunicación. Además contiene los eventos para leer y escribir a través del puerto serial.

La clase *SpeechRecognitionEngine* contiene diferentes métodos que se utilizan para configurar la gramática a utilizar durante el reconocimiento de comandos de voz, configurar el dispositivo de entrada de audio y también los métodos que son utilizados para asociar a los eventos del programa que tratan el reconocimiento.

La clase *SoundPlayer* es la encargada de utilizar la reproducción de audio para los comandos de voz de parte del RAD4-23.

Las relaciones entre las diferentes clases no tienen ningún tipo de herencia sino que solamente existen asociaciones entre ellas, ya que sus métodos y atributos son utilizados por la clase principal es decir *MainWindow*.

Las relaciones entre las clases se muestran en el diagrama UML, en la Figura 6.2

En la Figura 6.3 se muestra además el diagrama de llamadas de funciones dentro del programa principal.

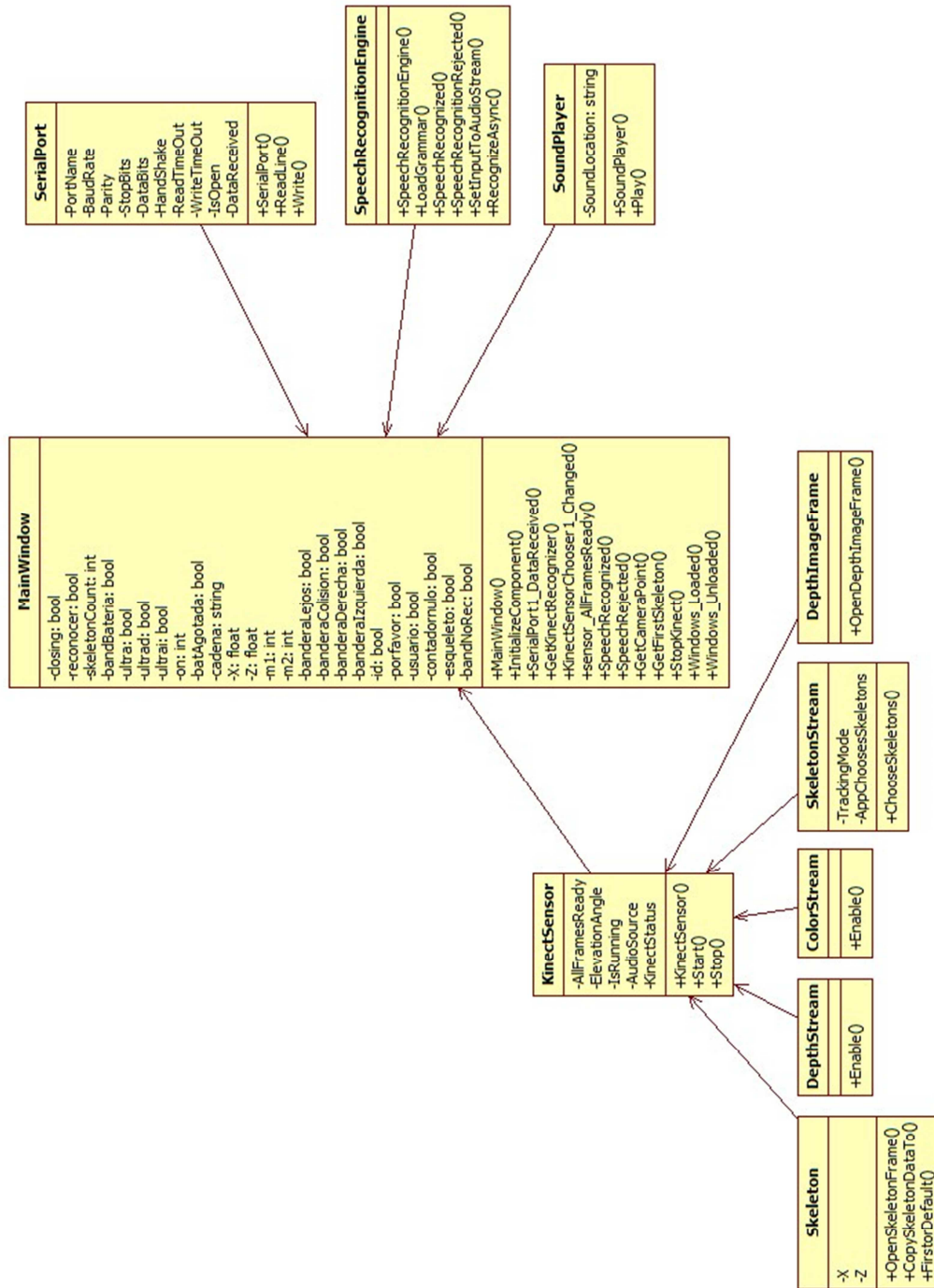


Figura 6.2 Diagrama UML del programa.

FUENTE: Elaboración propia

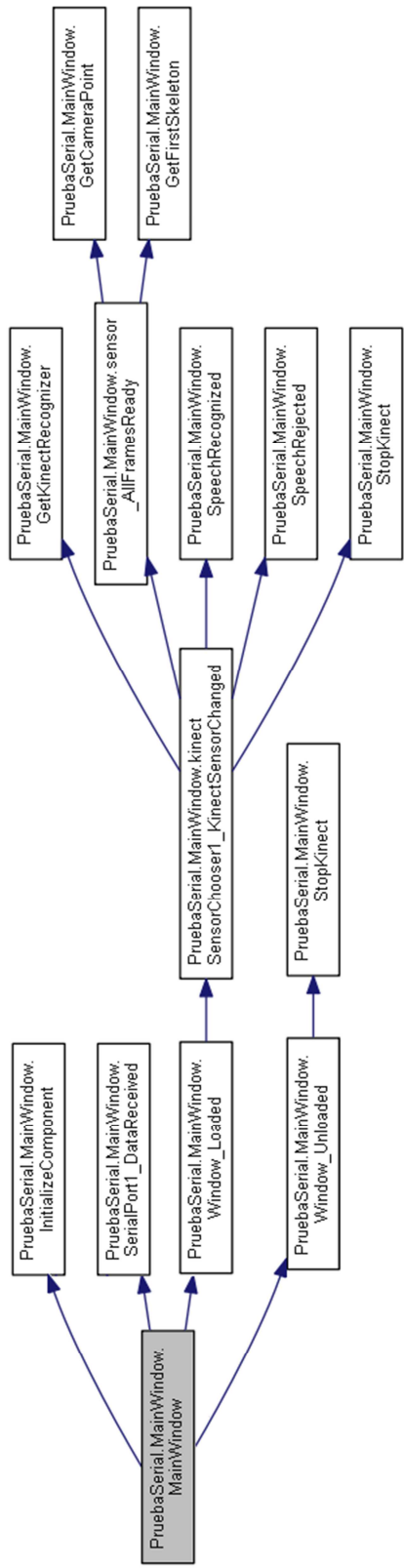


Figura 6.3 Diagrama de llamadas de funciones del programa del RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia

6.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA FUNCIONAMIENTO DEL RAD4-23

El programa del RAD4-23 consta de los algoritmos necesarios para lograr la comunicación del computador con la placa Arduino, la adquisición de datos del sensor Kinect y las decisiones de movimiento del robot. De manera que la placa Arduino en este caso simplemente es una interfaz entre los motores y sensores con el computador. El computador además adquiere los datos del sensor Kinect y evaluando estos componentes toma las decisiones de movimiento del robot.

Las relaciones existentes entre estos componentes se trataron en el capítulo 3.4.2 y el capítulo 3.4.3 donde se habla del sistema de seguimiento y control y del sistema de detección.

En el transcurso de este capítulo se desarrollará el programa y las librerías que se utilizan para su funcionamiento. Sin embargo antes de iniciar con el programa es necesario conocer las herramientas a utilizar para su desarrollo.

Para poder realizar la programación del RAD4-23 se utilizaron las siguientes herramientas de programación y paquetes.

- Microsoft Visual C# 2010 Express.
- Herramientas de desarrollo de Kinect (Kinect Developer Toolkit v1.5.2).
- Software de desarrollo para Kinect (Kinect SDK v1.5).
- Paquete de idioma para Kinect (Kinect Speech Language Pack es-MX).
- Herramientas para Kinect de Coding4Fun (Coding4Fun Kinect Toolkit).

Microsoft Visual C# 2010 Express es la interfaz de programación y compilador que se va a utilizar. Se necesita tener las librerías .NET Framework 4.0 las cuales vienen incluidas en esta versión de Visual C#.

Las herramientas de desarrollo de Kinect contienen todas las librerías necesarias para poder utilizar las diferentes funciones del sensor.

El software de desarrollo para Kinect contiene ejemplos de funcionamiento del sensor Kinect. Entre estos ejemplos tenemos el Kinect WPF Viewers q nos permite utilizar imágenes pre-programadas que muestran el estado de

funcionamiento del sensor Kinect lo cual facilita la programación de ciertos estados; como por ejemplo cuando el sensor no está conectado, el programa no da errores sino que muestra una advertencia de que no está conectado.

El paquete de idioma para Kinect contiene las librerías necesarias para programar los comandos de voz. En este caso necesitamos el paquete de idioma español-México.

Las herramientas para Kinect de Coding4Fun contienen ciertos objetos y métodos que facilitan la programación del sensor Kinect ya que estos encapsulan el código necesario para su funcionamiento. De manera que con pequeños métodos evitamos algunas líneas de programación y nos dedicamos a usar las características del sensor directamente.

6.2.1 COMUNICACIÓN ENTRE LA PLACA ARDUINO Y EL COMPUTADOR

La placa Arduino nos entrega la información tanto de los sensores delanteros como de los sensores traseros, además del nivel de la batería. Adicionalmente el Arduino es el encargado de mover los motores a través del puente H. De manera que este actúa solamente como una interfaz entre el computador y los sensores y motores, así que no toma ninguna decisión dentro del proceso sino que solamente recibe y envía información. Se decide que el computador y la placa Arduino envíen y reciban información utilizando comunicación serial, utilizando el estándar RS-232, el cual viene integrado en la placa Arduino. En la Figura 6.4 se muestra el sentido de comunicación entre los sensores, motores, placa Arduino y el computador.

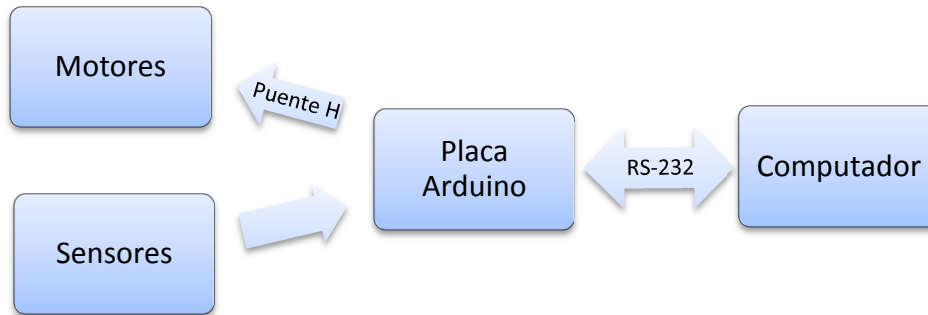


Figura 6.4 Comunicación entre motores, sensores, placa Arduino y computador.

Fuente: Elaboración propia.

Para utilizar esta comunicación se definen los parámetros de configuración, los cuales se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Parámetros de configuración de la comunicación serial entre Arduino y el computador.

Parámetro	Valor
Velocidad del puerto	9600 baudios
Bits de datos	8
Paridad	Sin paridad
Bits de parada	1
Control de flujo	Sin control de flujo

FUENTE: Elaboración propia

6.2.2 SUBPROCESOS DEL PROGRAMA

Para facilitar el entendimiento de la programación del RAD4-23 se la divide en subprocesos. Al utilizar subprocesos además se puede organizar la información mejor permitiendo visualizar el programa de forma general y después abarcar cada subproceso por separado.

Los subprocesos en que se dividió el programa son:

- Inicialización
- Adquisición de datos
- Decisión de movimientos
- Finalización

Cada uno de estos subprocesos se irá desarrollando a lo largo de este capítulo. En la Figura 6.5 se puede ver el diagrama de flujo del programa de funcionamiento del RAD4-23 y ver como estos subprocesos interactúan entre sí. Es importante notar que pese a que en este diagrama se muestran el flujo entre subprocesos como una interacción lineal o cíclica, dentro de ellos existen eventos que se disparan cuando se cumple su condición de activación, por lo tanto se activarán en cualquier momento dentro del programa y no necesariamente en orden.

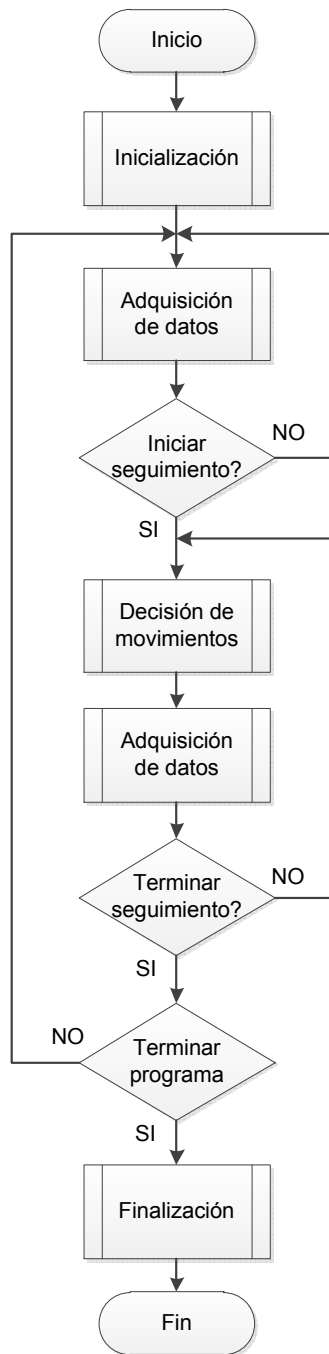


Figura 6.5 Diagrama de flujo del programa del RAD4-23.

FUENTE: Elaboración propia.

6.2.2.1 Inicialización

El subproceso de inicialización consiste en la configuración de los elementos a utilizar dentro del programa. Este subproceso se ejecuta una sola vez al iniciar el programa y realiza las siguientes acciones:

- Configuración y apertura del puerto serial.
- Inicialización del sensor Kinect.
- Configuración del sistema de seguimiento.
- Configuración del motor de reconocimiento de comandos de voz.

En la Figura 6.6 se muestra el diagrama de flujo del subproceso de inicialización.

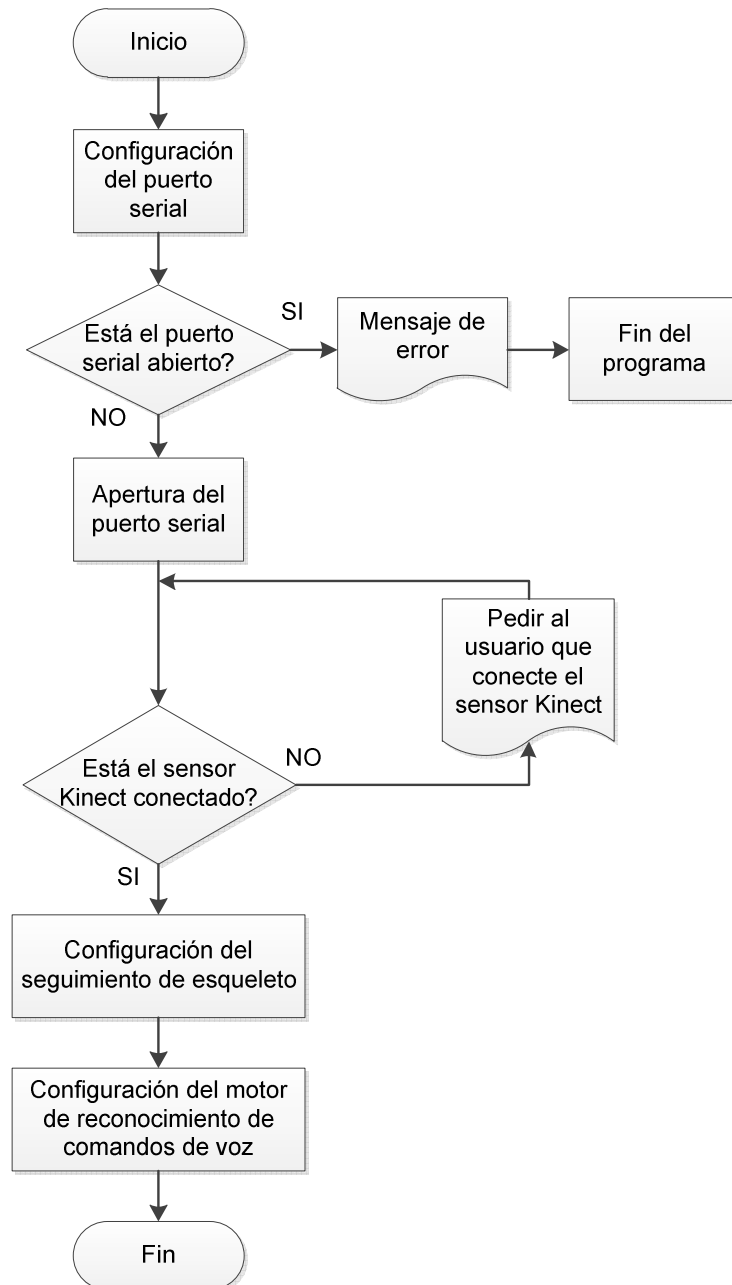


Figura 6.6 Diagrama de flujo del subproceso de inicialización.

FUENTE: Elaboración propia.

La configuración del puerto serial se la realiza agregando la referencia *IO.Ports* de las librerías .NET framework 4.0 y creando un objeto de puerto serial. A continuación accedemos a las propiedades de este objeto para dar las configuraciones según la Tabla 6.1.

Es importante preguntar si el puerto está abierto para evitar que el sistema se cuelgue al intentar abrir un puerto abierto. Por esa razón antes de abrir el puerto preguntamos su estado y si está abierto se indica un mensaje de error y se finaliza el programa, para ello el objeto serial nos bota una excepción y evaluándola podemos detener el programa. Debido a que en nuestro diseño comercial no tenemos una pantalla para visualizar este tipo de mensajes, el computador emitirá un comando de voz indicando que hay un error con el puerto serial y el programa terminará. Esto también nos ayuda en caso de que la placa Arduino no esté conectada al computador, ya que el objeto serial nos bota una excepción para este caso también.

En la siguiente etapa tratamos la conexión del sensor Kinect, ya que si este no está conectado esperará a que se conecte un sensor, la única manera de salir de este caso es conectando el sensor o saliendo del programa. La salida del programa es un evento y se puede ejecutar en cualquier parte del programa.

Una vez que el sensor Kinect sea conectado se realiza las siguientes configuraciones utilizando la librería *Kinect* de la herramienta "Kinect SDK v1.5.2.

- Seguimiento de esqueleto:
 - Modo de seguimiento sentado.
 - Resolución de 640x480 a 30Fps.
 - Se habilita el modo de seguimiento de esqueleto.
 - Se inicia el sensor Kinect.
- Motor de reconocimiento de comandos de voz.
 - Idioma de reconocimiento español-México.
 - Se crea el archivo de gramática y se carga en el motor de reconocimiento de comandos de voz.
 - Se inicia el modo de reconocimiento de voz del sensor Kinect.

El archivo de gramática es el que contiene los comandos de voz y se los asocia a una “dirección”. Para el RAD4-23 se colocaron dos direcciones:

- “EMPEZAR” que se activa con los comandos: “iniciar” o “empezar”
- “TERMINAR” que se activa con los comandos: “terminar” o “parar”

Las configuraciones del archivo de gramática son parte de la librería *Speech* que forma parte de las librerías de .NET Framework 4.0.

6.2.2.2 Adquisición de datos

El diagrama de flujo del subproceso de adquisición de datos se muestra en la Figura 6.7. Este proceso es el encargado de leer los datos a través de los siguientes procesos:

- Lectura del puerto serial
- Datos de seguimiento de esqueleto
- Datos de reconocimiento de comandos de voz

En este diagrama de flujo los tres procesos de adquisición se los representa en paralelo ya que estos son eventos y se disparan cada vez que se activa su condición de disparo.

La variable *Contadornulo* se la utiliza para poder dar mensajes al usuario cuando su esqueleto no ha sido reconocido. Cuando *Contadornulo* tiene el valor de 1 es porque el seguimiento de esqueleto no pudo reconocer el esqueleto del usuario aún después de haber reconocido el comando de voz. En este caso se pide al usuario que realice pequeños movimientos para que el sensor lo reconozca, esto es necesario debido a que en el modo “sentado” a veces es necesario que el usuario se mueva para que el sensor Kinect lo diferencie del fondo, tal como se explicó en el capítulo 4.1.5. Cuando *Contadornulo* tiene el valor de 2 es porque existe problemas de iluminación debido a que aún después de haberse movido el usuario en el primer caso y al haberse reconocido el comando de voz, el sensor no puede reconocer el esqueleto del usuario. En este caso se pide al usuario que pida asistencia, ya que para que el seguimiento de esqueleto lo reconozca por primera vez debe buscar un lugar con menos iluminación.

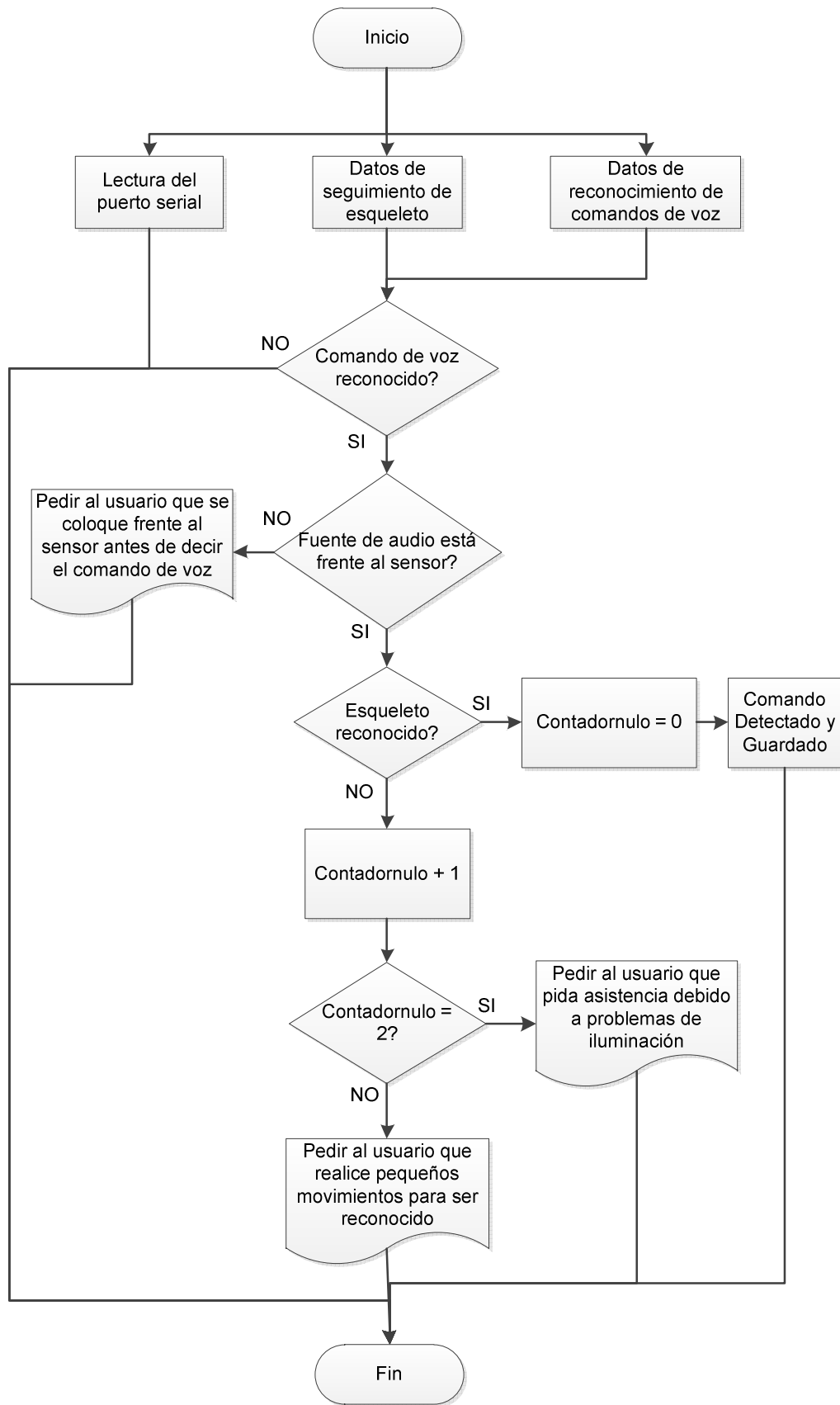


Figura 6.7 Diagrama de flujo del subproceso de adquisición de datos.

FUENTE: Elaboración propia.

La lectura del puerto serial se activa cada vez que llega un dato por el puerto serial. Para ello se configuró un evento de datos recibidos por el puerto serial. Este evento es parte de la librería *IO.Ports* que se explicó en el subproceso de inicialización, en el capítulo 6.2.2.1. Los datos recibidos por el puerto serial cambian los estados de las variables *ultra*, *ultrai*, *ultrad* y *batAgotada*. Donde:

- *ultra*: Cualquiera de los sensores delanteros ha sido activado.
- *ultrai*: Se activó el sensor trasero izquierdo.
- *ultrad*: Se activó el sensor trasero derecho.
- *batAgotada*: El nivel de la batería es bajo para el funcionamiento correcto del RAD4-23.

Los datos de seguimiento de esqueleto se activan cada vez que el computador tiene todos los cuadros (*frames*) listos, de manera que ya ha calculado la posición de la articulación utilizada para este proyecto que es el centro de los hombros. La posición del centro de los hombros es grabada en las variables *X* y *Z* que representan las distancias *X* y *Z* respectivamente del usuario al sensor Kinect.

Los datos de reconocimiento de comandos de voz se activan cada vez que se ha reconocido un comando de voz de los que están escritos dentro del archivo de gramática. El comando de voz “iniciar” pone en uno la bandera *Reconocer* y el comando de voz “terminar” pone en cero la bandera *Reconocer*, iniciando así el sistema de seguimiento o no. Los eventos de seguimiento de esqueleto y reconocimiento de voz son parte del objeto *KinectSensor* que forman parte de la librería *Kinect* que se habló también en el capítulo de inicialización.

6.2.2.3 Decisión de movimientos

El subproceso de decisión de movimientos es el encargado de evaluar la posición del usuario, tomar las acciones necesarias y comunicar a la placa Arduino del movimiento de los motores. Este subproceso tiene sus propios subprocesos dependiendo de la posición del usuario. En la Figura 6.8 se muestra el diagrama de bloques de la decisión de movimientos.

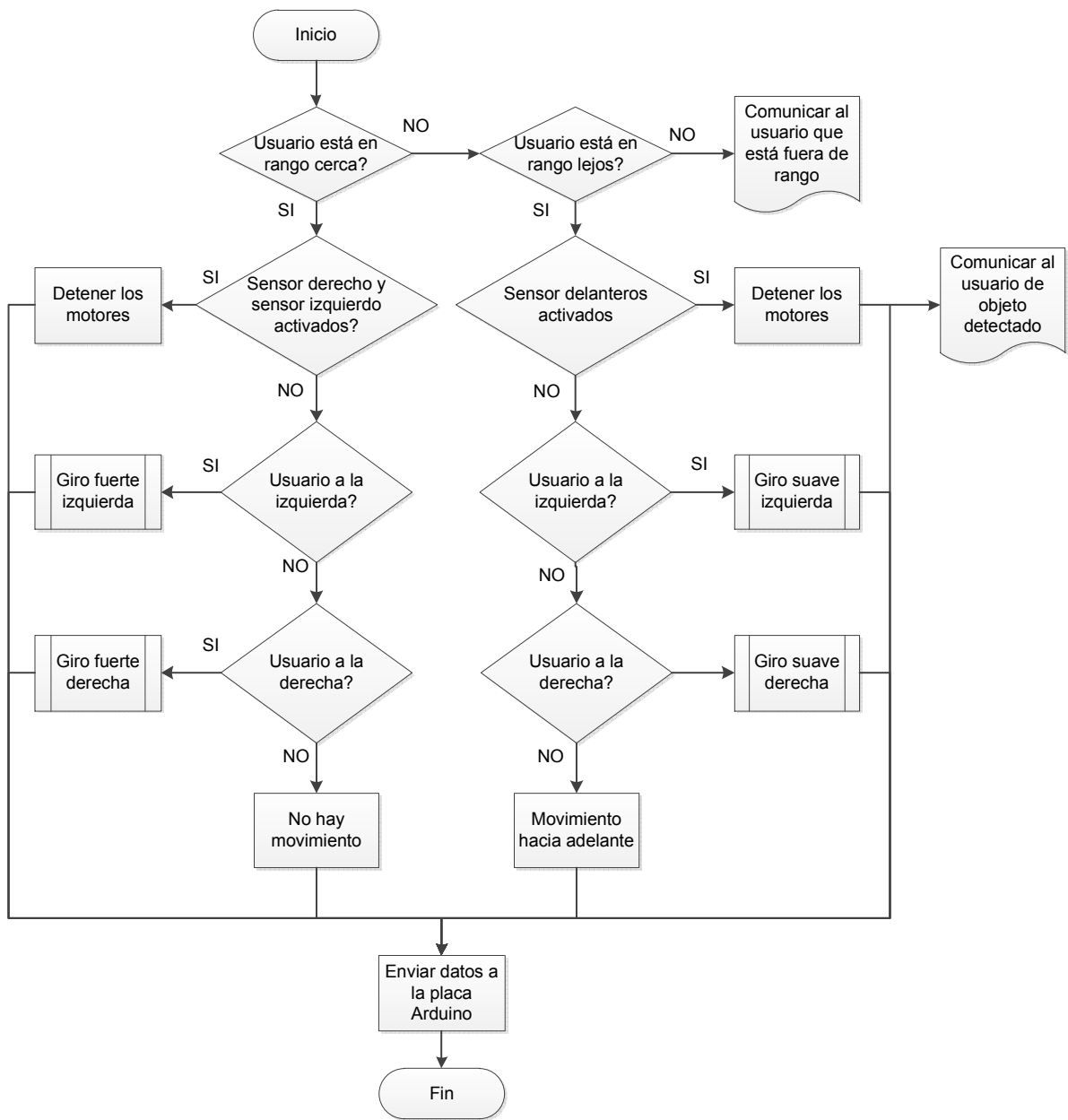


Figura 6.8 Diagrama de flujo del subproceso de decisión de movimientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Los rangos en los que se evalúan la posición del usuario son los siguientes:

- Rango cerca: $1\text{m} < Z < 1.6\text{m}$.
- Rango lejos: $1.6\text{m} < Z < 2.8\text{m}$.
- Usuario a la izquierda: $0.2\text{m} < X < 0.8\text{m}$.
- Usuario a la derecha: $-0.2\text{m} < X < -0.8\text{m}$.

Para cualquiera de los movimientos tenemos variables asignadas para la velocidad de cada motor, $m1$ para motor izquierda y $m2$ para motor derecha. Las decisiones de cada movimiento definen las velocidades de cada motor y a través de estas velocidades se logran las trayectorias que seguirá el RAD4-23. Estas variables $m1$ y $m2$ son enviadas por comunicación serial para que la placa Arduino se encargue del movimiento de los motores.

El rango de $m1$ y $m2$ es desde -400 hasta +400, donde -400 es giro hacia atrás a máxima velocidad y +400 es movimiento hacia adelante a máxima velocidad. De manera que el valor de cero significa que el motor está en reposo. Sin embargo hay que tomar en cuenta que además de tener velocidad cero, podemos frenar el motor. Para ello utilizamos diferentes terminadores dentro de la cadena enviada por el puerto serial donde:

- Terminador 'a': velocidad del motor izquierdo.
- Terminador 'b': velocidad del motor derecho.
- Terminador 'c': frenar el motor izquierdo.
- Terminador 'd': frenar el motor derecho.

La cadena enviada a través del puerto serial sería entonces la unión de la velocidad con su terminador, por ejemplo "400a" sería entonces 400 de velocidad en el motor izquierdo. En el caso de frenar los motores siempre se utiliza un valor de 50 para frenarlos, esto debido a que durante pruebas se pudo comprobar que es el freno menos brusco con mejores resultados.

Dentro del diagrama de bloques podemos notar tres procesos de movimiento y freno motores

- Detener los motores.
- No hay movimiento.
- Movimiento hacia adelante.

En el proceso "Detener los motores" se utiliza los terminadores de freno de motores. En el proceso "No hay movimiento" $m1$ y $m2$ tienen el valor de cero y se utiliza los terminadores de velocidad. El proceso "Movimiento hacia adelante" es el movimiento que se realiza cuando el usuario está lejos. Para lograr un control

suave se utiliza la ecuación de una recta para que a medida que el usuario se encuentre más lejos, la velocidad de movimiento sea mayor.

Debido a que la distancia de seguimiento entre el usuario y el robot tratada en el capítulo 6.1.1.1.3 es de 60cm, buscamos que el movimiento sea bastante rápido de manera que se realiza esta recta para que desde 1.6m a 1.8m tengamos variación de velocidad partiendo desde el valor de 200 y a partir de 1.8m ya tengamos la velocidad máxima. De manera que tendríamos:

Para $Z = 1.6m$ $m1$ y $m2$ tienen el valor de 200.

Para $Z = 1.8m$ $m1$ y $m2$ tienen el valor de 400.

La ecuación de la recta que obtenemos es entonces:

$$m1 = 1000 \times (Z - 1.6) + 200 \quad [6.1]$$

$$m2 = m1$$

Además de esta ecuación, también se utiliza límites para que los valores de $m1$ y $m2$ nunca sobrepasen el valor de 400 ni tenga un valor menor a -400, esto para evitar que el microcontrolador de la placa Arduino tenga problemas al momento de manejar los motores.

A continuación se desarrollan los subprocesos dentro de la decisión de movimientos los cuales son:

- Giro fuerte izquierda.
- Giro fuerte derecha.
- Giro suave izquierda.
- Giro suave derecha.

Los giros fuertes se trata de movimientos donde el un motor va hacia adelante y el otro hacia atrás, de manera que todo el robot gira respecto al centro de los motores sin moverse hacia adelante.

Los giros suaves son movimientos donde los dos motores se mueven hacia adelante pero con diferentes velocidades, logrando de esta manera trayectorias de giro mientras el robot se mueve.

6.2.2.3.1 Giro fuerte izquierda

Cuando el RAD4-23 realiza un giro fuerte hacia la izquierda, se trata de un giro donde el motor derecho gira hacia adelante y el motor izquierdo hacia atrás. Durante este giro es necesario evaluar si el sensor trasero derecho se encuentra activado para evitar una colisión. El diagrama de flujo de este subproceso se muestra en la Figura 6.9.

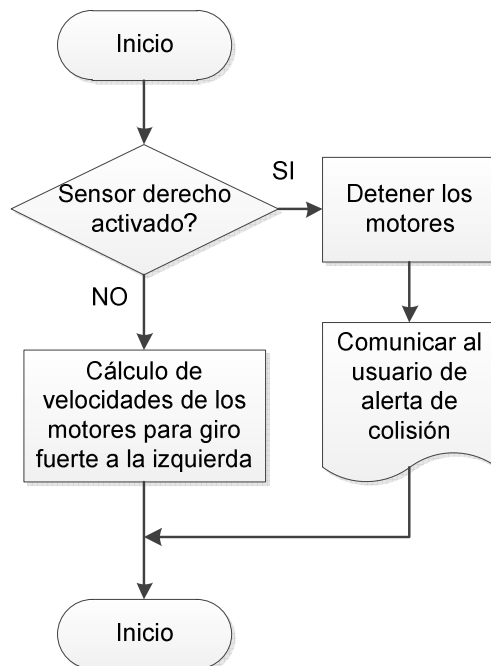


Figura 6.9 Diagrama de flujo de giro fuerte a la izquierda.

FUENTE: Elaboración propia.

Para este caso de igual manera se desea que la velocidad de giro dependa de la posición del usuario. Por lo que se definió los límites como:

Para $X = 0.2m$ $m2 = 100$.

Para $X = 0.8m$ $m2 = 400$.

El valor de $m1$ es el negativo de $m2$ para lograr el giro fuerte.

La ecuación de la recta que obtenemos es entonces:

$$m2 = 500 \times (X - 0.2) + 100 \quad [6.2]$$

$$m1 = m2 \times (-1)$$

De igual manera que en el movimiento hacia adelante, se limitan los valores de $m1$ y $m2$ entre -400 y +400.

6.2.2.3.2 Giro fuerte derecha

Cuando el RAD4-23 realiza un giro fuerte hacia la derecha, se trata de un giro donde el motor izquierdo gira hacia adelante y el motor derecho hacia atrás. De manera análoga al giro fuerte izquierdo, durante este giro es necesario evaluar si el sensor trasero izquierdo se encuentra activado para evitar una colisión. El diagrama de flujo de este subproceso se muestra en la Figura 6.10.

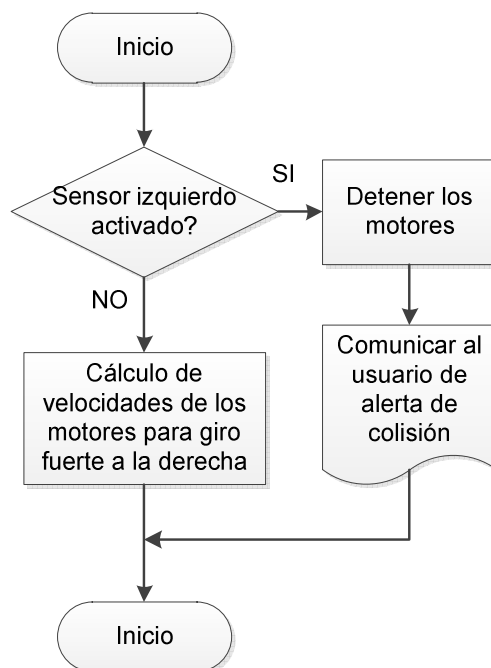


Figura 6.10 Diagrama de flujo de giro fuerte a la derecha.

FUENTE: Elaboración propia.

Al igual que en el giro fuerte a la izquierda se calcula el valor de los motores para que este dependa de la posición del usuario. Se utilizó la misma ecuación que para el giro fuerte izquierda, con la diferencia de que tratamos de valores negativos de X por lo que es necesario multiplicar por -1 para obtener los valores análogos a los del giro fuerte izquierda. La ecuación de la recta que obtenemos es entonces:

$$m1 = 500 \times ((-1 \times X) - 0.2) + 100 \quad [6.3]$$

$$m2 = m1 \times (-1)$$

Y de igual manera, se limitan los valores de $m1$ y $m2$ entre -400 y $+400$.

6.2.2.3.3 Giro suave izquierda

En el giro suave a la izquierda los dos motores se mueven hacia adelante pero el motor derecho tiene más velocidad que el motor izquierdo. El diagrama de flujo de este subproceso se muestra en la Figura 6.11.

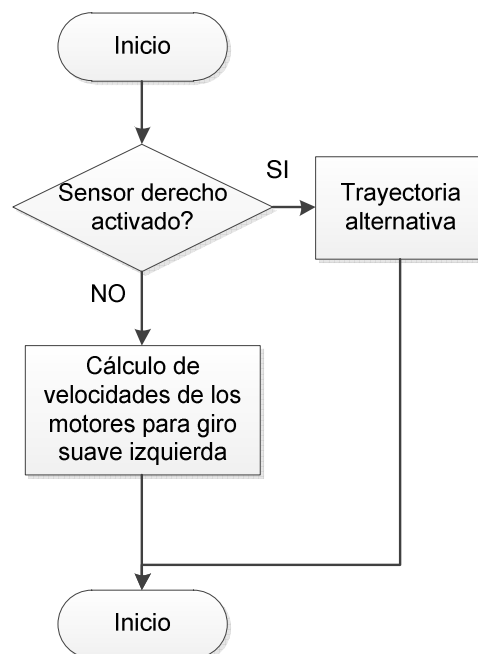


Figura 6.11 Diagrama de flujo de giro suave izquierda.

FUENTE: Elaboración propia.

En el caso del giro suave hacia la izquierda mantenemos el motor derecho a máxima velocidad mientras que el motor izquierdo cumple con la siguiente recta:

Para $X = 0.2\text{m}$ $m1 = 400$.

Para $X = 0.8\text{m}$ $m1 = 200$.

La ecuación de la recta sería entonces:

$$m1 = -333 \times (X - 0.2) + 400 \quad [6.4]$$

$$m2 = 400$$

De igual manera, se limitan los valores de $m1$ y $m2$ entre -400 y +400.

En el caso de que el sensor derecho se haya activado buscamos una trayectoria alternativa que tiene un movimiento más lento y con un giro menos pronunciado, de esta manera el robot avanzará pero de tal manera que no colisionará con el objeto que se encuentre a su derecha. En este caso tenemos valores constantes de:

$$m2 = 200$$

$$m1 = 150$$

6.2.2.3.4 Giro suave derecha

En el giro suave a la izquierda los dos motores se mueven hacia adelante pero el motor izquierdo tiene más velocidad que el motor derecho. Este es un movimiento análogo al del giro suave izquierda. El diagrama de flujo de este subproceso se muestra en la Figura 6.12.

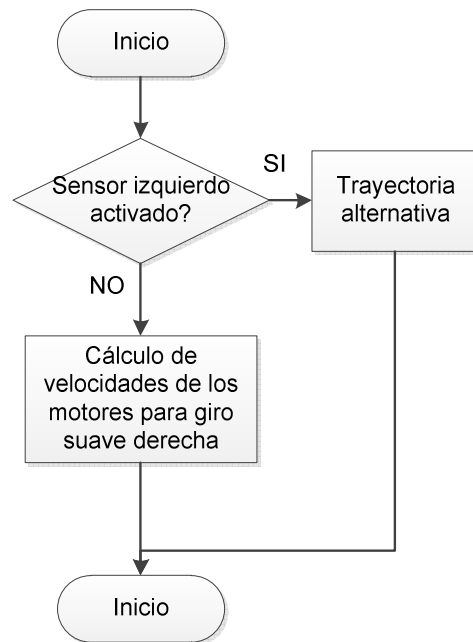


Figura 6.12 Diagrama de flujo de giro suave derecha.

FUENTE: Elaboración propia.

Para el giro suave a la derecha mantenemos el motor izquierdo a máxima velocidad mientras que para el motor derecho se utilizó la misma ecuación que para el giro suave izquierda, con la diferencia de que tratamos de valores negativos de X por lo que es necesario multiplicar por -1 para obtener los valores análogos a los del giro suave izquierda. La ecuación de la recta que obtenemos es entonces:

$$m2 = -333 \times ((-1 \times X) - 0.2) + 400 \quad [6.5]$$

$$m1 = 400$$

Y de igual manera, se limitan los valores de $m1$ y $m2$ entre -400 y $+400$.

En el caso de que el sensor izquierdo se haya activado buscamos una trayectoria alternativa como se explicó en el giro suave izquierda, en este caso tenemos valores constantes de:

$$m1 = 200$$

$$m2 = 150$$

6.2.2.4 Finalización

El subproceso de finalización consiste en detener los elementos que se iniciaron en el subproceso de inicialización. Este subproceso se ejecuta una sola vez al terminar el programa y realiza las siguientes acciones:

- Cerrar el puerto serial.
- Detener el sensor Kinect.

En la Figura 6.13 se muestra el diagrama de flujo del subproceso de finalización.

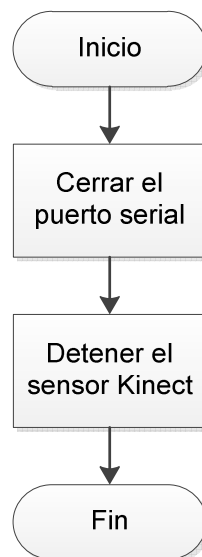


Figura 6.13 Diagrama de flujo del subproceso de finalización.

FUENTE: Elaboración propia.

En el proceso en el cual se detiene el sensor Kinect, se detiene el sistema de seguimiento de esqueleto y el motor de reconocimiento de comandos de voz.

CAPITULO 7

VALIDACIÓN GENERAL DEL RAD4-23

Luego de haber construido al RAD4-23 y de haber realizado la programación correspondiente, se somete al robot a pruebas de campo para verificar que cumpla con el objetivo propuesto al inicio de este documento. Después de haber diseñado las pruebas necesarias para evaluar el funcionamiento el RAD4-23, los datos recopilados son analizados para obtener resultados que nos permitan calificar su funcionamiento. El programa utilizado para estas pruebas fue cargado al computador portátil y corre en el ambiente de programación, sin embargo en el diseño comercial del RAD4-23 el programa será parte del sistema embebido del computador.

7.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS

El objetivo principal del RAD4-23 es el de realizar un seguimiento de la trayectoria del usuario tomando en cuenta obstáculos y diferentes casos críticos que se puedan presentar dentro de un centro comercial en un ambiente real.

Las variables a evaluar cualitativamente son:

- Seguimiento de trayectoria.
- Detección de obstáculos.
- Reconocimiento de comandos de voz.

De estas tres variables se derivan las funciones del RAD4-23 que se evaluarán en las pruebas diseñadas.

7.1.1 DISEÑO DE PRUEBAS

Para el diseño de las pruebas se tiene una lista de todas las funciones que realiza el RAD4-23, y se propone diferentes pruebas que evalúan estas funciones, como se muestra en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Diseño de pruebas.

N°	PRUEBAS	FUNCIONES A EVALUARSE
1	Movimiento del usuario en espacios libres	Seguimiento de línea recta.
		Seguimiento de curvas suaves.
		Seguimiento de curvas bruscas.
2	Movimiento del usuario entre dos perchas	Seguimiento de línea recta.
		Seguimiento de curvas suaves.
		Evasión en curvas suaves por colisión.
3	Giros de entrada a las perchas.	Seguimiento de curvas suaves.
		Evasión en curvas suaves por colisión.
4	Giros de salida a las perchas.	Seguimiento de curvas bruscas.
		Detenimiento en curvas bruscas por colisión.
		Reproducción de comando de voz de "advertencia de colisión".
5	Giros en U desde una sección de perchas a otra	Seguimiento de curvas suaves.
		Evasión en curvas suaves por colisión.

		Seguimiento de curvas bruscas.
		Detenimiento en curvas bruscas por colisión.
		Reproducción de comando de voz de "advertencia de colisión".
6	Evitar colisiones con objetos entre el usuario y el robot dentro de dos perchas	Detenimiento por detección de obstáculos.
7	Evitar colisiones laterales en caso de giros bruscos entre dos perchas	Detenimiento por curvas bruscas por colisión.
		Reproducción de comando de voz de "advertencia de colisión".
8	Avisos y finalización del sistema en caso de interferir una persona entre el robot y el usuario.	Detenimiento por detección de obstáculos.
		Reproducción de comando de voz de "espere por favor".
9	No reconocer a otra persona durante el funcionamiento.	Continuidad del sistema.
10	Reconocimientos de comandos de voz.	Inicio del sistema.
		Reproducción de comando de voz de bienvenida al sistema.

FUENTE: Elaboración propia.

Para obtener un cuantificador que nos indique el nivel de funcionamiento, se dará valoración a cada una de las pruebas dependiendo en el comportamiento del RAD4-23 ante ciertas circunstancias dentro de ciertos parámetros. Para pruebas de seguimiento y detección se dará valores del 1 al 5 dependiendo del comportamiento del RAD4-23, de igual manera, para el reconocimiento de comandos de voz se dará valores, en este caso del 1 al 3 dependiendo del número de veces que se tuvo que repetir el comando de voz requerido para que

el RAD4-23 lo reconozca, las ponderaciones y parámetros se indica en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Ponderación para las pruebas de campo.

PONDERACIÓN	PARÁMETROS
Pruebas de seguimiento y detección (Prueba 1 – prueba 9)	
1	En caso de que el robot no realice el seguimiento del cuerpo.
2	En caso de que el robot colisione.
3	En caso de que el robot no colisione pero pierda el reconocimiento del usuario sin motivo durante la prueba.
4	En caso de que el robot realice el seguimiento pero con trayectorias no deseadas.
5	En caso de que el robot realice el seguimiento sin inconvenientes.
Pruebas de reconocimiento de comandos de voz (prueba 10)	
1	Si el comando de voz no es reconocido después de repetirlo más de 4 veces.
2	Si el comando de voz no es reconocido después de repetirlo 3 o 4 veces.
3	Si el comando de voz no es reconocido después de repetirlo 1 u 2 veces.

FUENTE: Elaboración propia.

Estas pruebas serán realizadas bajo dos circunstancias reales:

- Sin personas alrededor del usuario y del RAD.
- Con personas alrededor del usuario y del RAD.

Cabe resaltar que las pruebas 8 y 9 serán realizadas únicamente con personas alrededor del usuario y del RAD4-23, debido a que la prueba en sí requiere de la presencia de terceros.

De igual manera se realizan además pruebas para verificar el funcionamiento del reconocimiento de comandos de voz del RAD4-23, estas pruebas se realizan bajo las dos circunstancias:

- En un ambiente sin ruido.
- En un ambiente con ruido.

Las calificaciones de cada prueba serán ingresadas en la Tabla 7.3 para seguimiento y Tabla 7.4 para reconocimiento de comandos de voz.

Tabla 7.3 Tabla para ingreso de datos de las pruebas de seguimiento.

Nº	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9
1	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
2	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
3	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
4	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
5	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.	Calif.
Promedio									

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 7.4 Tabla para ingreso de datos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz.

Nº	Prueba 10	Prueba 11
1	Calif.	Calif.
2	Calif.	Calif.
3	Calif.	Calif.
4	Calif.	Calif.
5	Calif.	Calif.
Promedio		

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.2 TIPOS DE PRUEBAS

Las pruebas a realizarse se muestran gráficamente a continuación:

- Movimiento del usuario en espacios libres. (Figura 7.1).

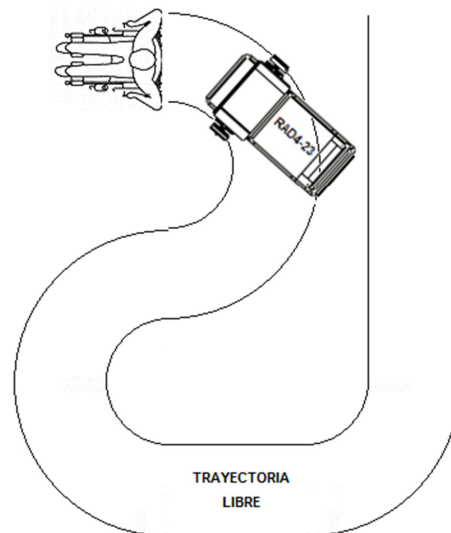


Figura 7.1 Prueba 1.

FUENTE: Elaboración propia

- Movimiento del usuario entre dos perchas. (Figura 7.2).

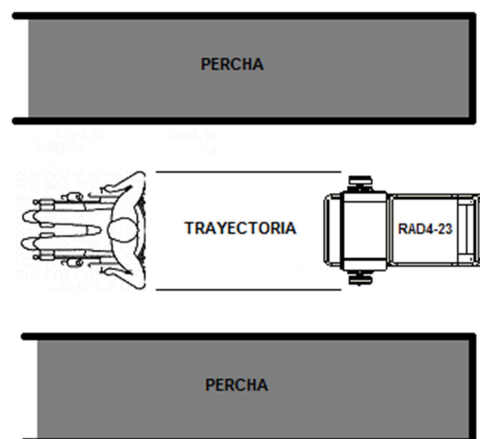


Figura 7.2 Prueba 2.

FUENTE: Elaboración propia.

- Giros de entrada a las perchas. (Figura 7.3).

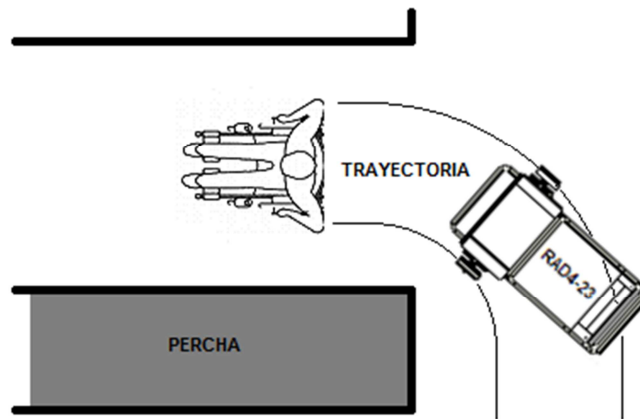


Figura 7.3 Prueba 3.

FUENTE: Elaboración propia.

- Giros de salida de las perchas. (Figura 7.4).

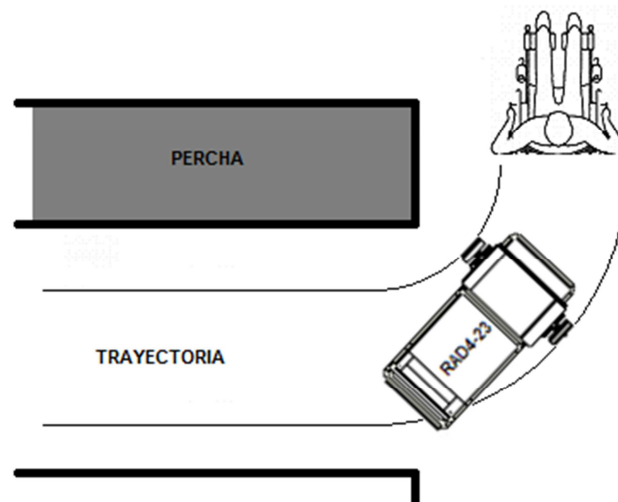


Figura 7.4 Prueba 4.

FUENTE: Elaboración propia.

- Giros en U desde una sección de perchas a otra. (Figura 7.5).

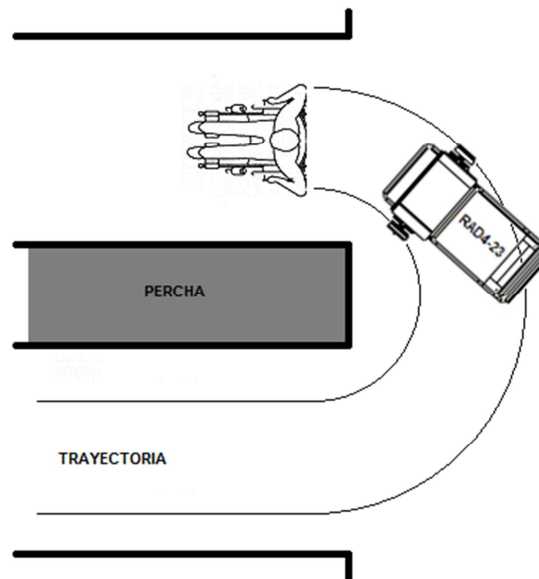


Figura 7.5 Prueba 5.

FUENTE: Elaboración propia.

- Evitar colisiones con objetos entre el usuario y el robot dentro de dos perchas. (Figura 7.6).

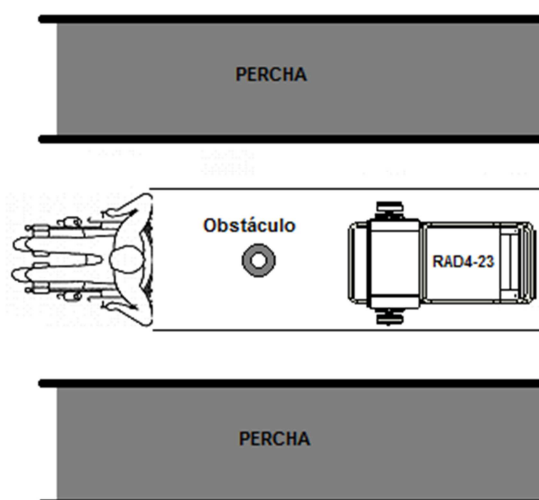


Figura 7.6 Prueba 6.

FUENTE: Elaboración propia.

- Evitar colisiones laterales en caso de giros bruscos entre dos perchas. (Figura 7.7).

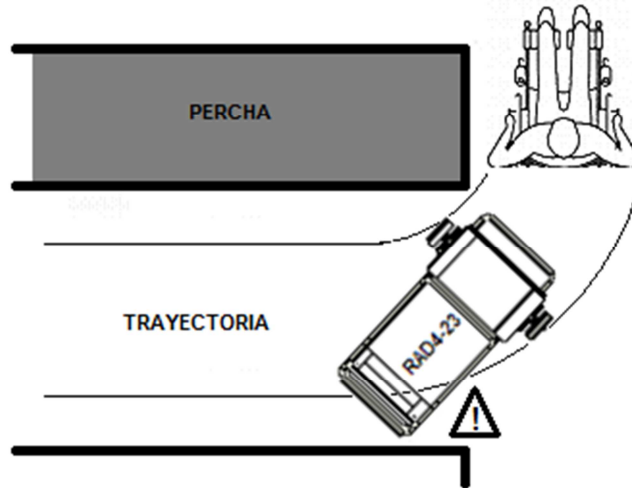


Figura 7.7 Prueba 7.

FUENTE: Elaboración propia.

- Avisos y finalización del sistema en caso de interferir una persona entre el robot y el usuario.

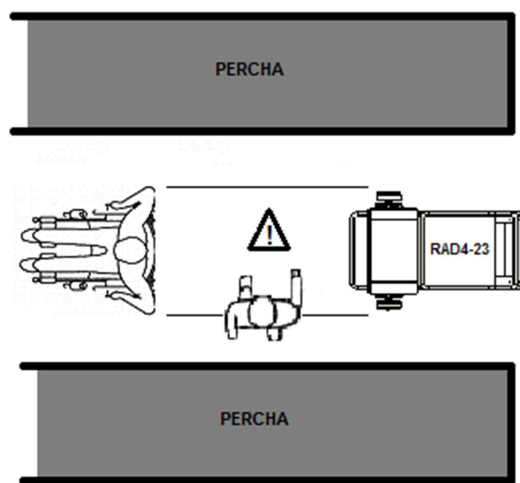


Figura 7.8 Prueba 8.

FUENTE: Elaboración propia.

- No reconocer a otra persona durante el funcionamiento. (Figura 7.9).

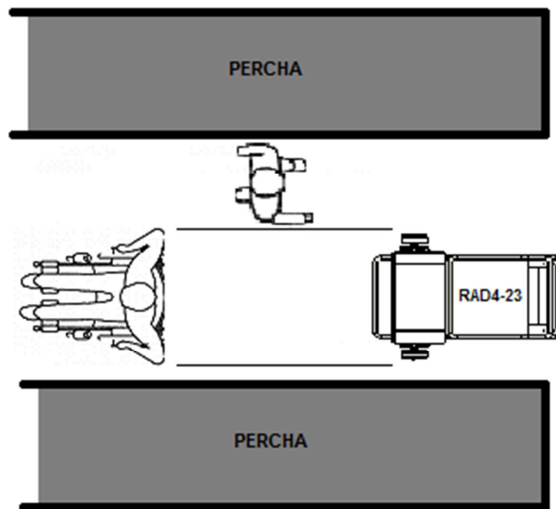


Figura 7.9 Prueba 9.

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.3 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS

Teniendo en cuenta los parámetros y las ponderaciones que se califican en las pruebas se propone la metodología a seguir, indicada en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5 Metodología de las pruebas.

Objetivo	Obtener el nivel del funcionamiento de las tres variables que se van a poner a prueba, seguimiento de trayectoria, detección de obstáculos y reconocimiento de comandos de voz.
Técnica	Ponderación según el comportamiento del robot, siguiendo la puntuación establecida.
Cuantificadores	Seguimiento de trayectoria: no tiene cuantificador. Detección de obstáculos: no tiene cuantificador. Reconocimiento de comandos de voz: no tiene cuantificador. Las variables se las calificará cualitativamente.

Recursos	<ul style="list-style-type: none"> • RAD4-23 • Instalaciones del supermercado • Usuario • Silla de ruedas
Metodología	<ol style="list-style-type: none"> 1. Activar interruptor de alimentación del RAD4-23. 2. Arrancar Software de funcionamiento del RAD4-23. 3. El usuario debe ubicarse frente al RAD4-23. 4. Dar el comando de voz de inicio. 5. Realizar la prueba 1 sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23. 6. Tabular el puntaje que se obtuvo al realizar la prueba 1 sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23. 7. Repetir el procedimiento de los pasos 5 y 6, 5 veces. 8. Repetir el procedimiento de los pasos 5,6 y 7 con las pruebas de la 2 a la 7. 9. Realizar la prueba 1 con personas alrededor del usuario y del RAD4-23. 10. Tabular el puntaje que se obtuvo al realizar la prueba 1 con personas alrededor del usuario y del RAD4-23. 11. Repetir el procedimiento de los pasos 9 y 10, 5 veces. 12. Repetir el procedimiento de los pasos 9,10 y 11 con las pruebas de la 2 a la 9. 13. Realizar la prueba de reconocimiento de voz en ambientes sin ruidos 14. Tabular el puntaje que se obtuvo al realizar la prueba de reconocimiento de voz en ambientes sin ruido. 15. Repetir el procedimiento de los pasos 13 y 14, 5 veces. 16. Repetir el procedimiento 13, 14 y 15 en ambientes ruidosos.

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.4 EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

Las pruebas fueron realizadas en las instalaciones del comercial Mega Kywi de la avenida Eloy Alfaro en la ciudad de Quito, aprovechando el amplio espacio entre perchas que existe en estas instalaciones se realizaron con total comodidad las pruebas establecidas en el capítulo 7.1.2.

Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 7.1.3 se dispone a realizar las pruebas y tabulaciones correspondientes en el siguiente orden:

- Pruebas de seguimiento y detección sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23 (Tabla 7.6).
- Pruebas de seguimiento y detección con personas alrededor del usuario y del RAD4-23 (Tabla 7.7).
- Pruebas de reconocimiento de voz en ambientes sin ruido (Tabla 7.8).
- Pruebas de reconocimiento de voz en ambientes con ruido (Tabla 7.9).

7.1.4.1 Pruebas de seguimiento y detección sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23.

Tabla 7.6 Datos obtenidos de las pruebas de seguimiento y detección sin personas alrededor del usuario y del RAD4-23.

Nº	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
1	4	5	5	5	5	5	3
2	5	5	5	5	5	4	5
3	5	5	5	5	5	5	5
4	5	3	5	5	5	2	5
5	3	3	5	5	5	5	5
Promedio	4,4	4,2	5	5	5	4,2	4,6

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.4.2 Pruebas de seguimiento y detección con personas alrededor del usuario y del RAD4-23.

Tabla 7.7 Datos obtenidos de las pruebas de seguimiento y detección con personas alrededor del usuario y del RAD4-23.

Nº	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9
1	5	5	5	5	5	5	5	5	3
2	5	5	4	5	5	5	5	5	5
3	5	5	5	4	3	4	5	5	4
4	5	5	5	5	5	5	3	5	5
5	5	5	5	5	5	4	5	5	5
Promedio	5	5	4,8	4,8	4,6	4,6	4,6	5	4,4

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.4.3 Pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes sin ruido.

Tabla 7.8 Datos obtenidos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes sin ruido.

Nº	Prueba 10	Prueba 11
1	3	3
2	3	3
3	3	2
4	3	2
5	3	3
Promedio	3	2,6

FUENTE: Elaboración propia.

7.1.4.4 Pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes con ruido.

Tabla 7.9 Datos obtenidos de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz en ambientes con ruido.

Nº	Prueba 10	Prueba 11
1	3	3
2	2	2
3	3	3
4	3	3
5	2	1
Promedio	2,6	2,4

FUENTE: Elaboración propia.

7.2 RESULTADO DE LAS PRUEBAS

Se observa con más claridad los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la Tabla 7.10 y en la Tabla 7.11 para realizar el análisis correspondiente de las variables mencionadas en el capítulo 7.1.

Tabla 7.10 Resumen de resultados de las pruebas de seguimiento y control.

Pruebas de seguimiento y detección	Prueba	Sin personas	Con personas
	Prueba 1	4,4	5
	Prueba 2	4,2	5
	Prueba 3	5	4,8
	Prueba 4	5	4,8
	Prueba 5	5	4,6
	Prueba 6	4,2	4,6
	Prueba 7	4,6	4,6
	Prueba 8	N/A	5
	Prueba 9	N/A	4,4
	Promedio	4,63	4,8
	Porcentaje	92,57%	95,11%

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 7.11 Resumen de resultados de reconocimiento de comandos de voz.

Pruebas de reconocimiento de comandos de voz	Prueba	Sin ruido	Con ruido
	Prueba 1	3	2,6
	Prueba 2	2,6	2,4
	Promedio	2,80	2,5
	Porcentaje	93,33%	83,33%

FUENTE: Elaboración propia.

Como se puede observar, los resultados obtenidos después de realizar las pruebas son muy cercanos al puntaje total sobre 5 en el caso de las pruebas de seguimiento de trayectoria y detección de obstáculos, de igual manera sobre 3 en el caso de las pruebas de reconocimiento de comandos de voz, el puntaje es muy cercano al puntaje total.

Las pruebas de seguimiento de trayectoria lograron cumplir con el objetivo planteado. Al realizar seguimiento en espacios libres el RAD4-23 no tuvo problemas con el seguimiento de la trayectoria del usuario. Cuando se comenzó a realizar el movimiento entre dos perchas se notó que una de las llantas delanteras resbalaba en ciertos momentos debido a que estaba lisa. Debido a esto, cuando el robot perdía la trayectoria por cortos intervalos de tiempo este retomaba la trayectoria y continuaba con el seguimiento, pero si el intervalo de tiempo era más prolongado el RAD4-23 dejaba de reconocer al usuario por que quedaba totalmente en otra dirección.

Al momento de realizar las pruebas de giros de salida y entrada a las perchas, se observó que debido a que el giro era suave y continuo no tuvimos problema con las llantas lisas por lo que el seguimiento de la trayectoria en estas pruebas obtuvo un puntaje casi perfecto.

Luego se realizó las pruebas de detección, en las cuales se obtuvo un buen puntaje debido a que los sensores delanteros detectan cualquier objeto que esté dentro del 80% del rango que se cubrió. De igual manera los sensores traseros evitaron todo tipo de colisión al momento de realizar giros bruscos, en estos casos el RAD4-23 envía un comando de voz, indicando que hay peligro de colisión, para que el usuario tome otra trayectoria para continuar el recorrido. Al momento en que una persona se cruzaba entre el usuario y el robot, este automáticamente

termina su funcionamiento normal y no se mueve hasta que el usuario nuevamente inicie el seguimiento por comando de voz.

Durante la prueba de detección, por una ocasión el RAD4-23 detectó a otra persona en lugar del usuario en todo el recorrido de las pruebas, lo que se considera muy bueno, considerando el número de personas que se encontraban alrededor del RAD4-23.

Por último se realizaron las pruebas de reconocimiento de comandos de voz en diferentes ambientes, obteniendo los resultados deseados, se tuvo que repetir mayor número de veces el comando de voz cuando el ambiente se encontraba con ruido, de todas formas los resultados fueron positivos comparándolos con el puntaje total.

El único problema que sobresalió fue las llantas lisas, por lo que se busca dar más agarre a las llantas delanteras con un adhesivo antideslizante que permita un mejor desempeño del RAD4-23 al momento de realizar el seguimiento.

7.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CALIFICACIÓN DEL RAD4-23

Con los resultados mostrados en la Tabla 7.10 y la Tabla 7.11 podemos calificar el funcionamiento general del RAD4-23. Se promediaron los diferentes funcionamientos ya que cada una de las pruebas es importante en el puntaje global. Además dividimos el seguimiento del usuario, del reconocimiento de comandos.

Como se puede notar en la Tabla 7.10 el porcentaje obtenido es del 92,57% cuando no hay personas en las cercanías y del 95,11% cuando si las hay. Se esperaba que el resultado con personas sea menor debido a que tiene mayores condiciones para el funcionamiento correcto, sin embargo este resultado se debe al problema de las llantas lisas, ya que en ciertos espacios resbalaron y en otros no, y en los puntajes que se anotaron cuando existían personas cerca del robot este no resbaló.

Con fines de calificación general se toma la peor calificación aunque el problema de las llantas sea solucionable, de manera que en general el RAD4-23 tiene una calificación del 92,57% en el seguimiento. Si se soluciona el problema de las llantas lisas utilizando un adhesivo antideslizante se obtendría un puntaje mayor.

Con respecto al reconocimiento de comandos de voz, en la Tabla 7.11 podemos ver que cuando no tenemos ruido en el ambiente la calificación que obtuvo es del 93,33% y con ruido es del 83,33%. En este caso tomamos en cuenta la calificación con ruido debido a que en el ambiente dentro del supermercado puede existir ruido en cualquier momento. De manera que la calificación del reconocimiento de comando de voz es del 83,33%.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- El prototipo de robot cuatricar asistente de simple tracción para personas discapacitadas realizado, cumple el funcionamiento planteado, ya que se logró una calificación del 92,57% de funcionalidad durante el seguimiento y del 83,33% de reconocimiento de comandos de voz. De manera que el RAD4-23 sí puede asistir en forma satisfactoria a una persona discapacitada mientras realiza compras en un supermercado.
- El diseño del RAD4-23 se adaptó perfectamente a la antropometría de una persona con discapacidad física que utiliza silla de ruedas, debido a que las dimensiones del robot brindan comodidad al usuario. Dentro del alcance de este proyecto, la canastilla para los productos no es parte del diseño, sin embargo se hicieron simulaciones de ubicar o extraer productos del área correspondiente para esta actividad y se obtuvo muy buenos resultados.
- El robot pudo satisfacer los requerimientos establecidos en el Capítulo 2.2.2, los cuales se detallan cómo se cumplieron en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Cumplimiento de los requerimientos del usuario.

Parámetro	Requerimiento	Obtenido	Referencia
Velocidad	Mínima de 0.6m/s y máxima de 1m/s	0.6m/s	Capítulo 3.5.1.1.1.1
Autonomía	Mínima de 1,5 horas	2 horas *	Capítulo 3.5.4.1.2
Estructura Resistente	Soporta su propio peso	Carga adicional de 20Kg.	Capítulo 3.5.1.3.1.1.5.1
Capacidad de productos	Alta	Alta debido a las dimensiones del espacio para la canastilla en la estructura inferior y a la estructura resistente.	Capítulo 3.5.1.3.1.1.5.1
Aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto debido la forma y a detalles de uso de material, pintura y fabricación de la carcasa con fibra de vidrio.	Capítulo 5.7
Seguridad	Que el robot sea seguro	Seguro debido al uso de baterías selladas de gel para evitar contaminación y además del uso de sensores ultrasónicos para detección de objetos en las cercanías del robot.	Capítulo 3.5.4.1.2 y Capítulo 3.4.3
Emisión de ruido al ambiente	Silencioso	El robot es silencioso debido al uso de motores DC.	Capítulo 3.3.2
Usabilidad	Fácil de usar	Uso de comandos de voz como interfaz entre el robot y el usuario	Capítulo 6.1.1.1.2

FUENTE: Elaboración propia.

* La autonomía lograda por el prototipo construido es mayor debido al uso del computador portátil, razón por la cual se tiene un consumo menor de corriente al no existir el computador embebido.

- Como primer diseño los resultados obtenidos son excelentes por parámetros de funcionalidad, seguridad y confiabilidad.
- El RAD4-23 como fue bautizado el robot asistente, cumplió con todas las metas propuestas para los fines de este proyecto de manera que se concluye que este proyecto tuvo el éxito esperado.
- En el Anexo C se muestra un manual de usuario para el funcionamiento del RAD4-23.

8.2 RECOMENDACIONES

- Para el mejoramiento del prototipo considerar la optimización de las especificaciones técnicas en base a la aplicación de partes, piezas, elementos y subsistemas que faciliten el cumplimiento apropiado de sus parámetros.
- Realizar el análisis apropiado de los errores cometidos durante el transcurso de este proyecto para lograr un producto de mejor calidad y satisfacción del usuario.
- Considerar el uso de piezas, sensores y materiales que abaraten el costo total del robot siempre que se mantenga el objetivo de cumplir con los requerimientos del usuario.
- Promover este tipo de proyectos en los futuros egresados para aportar en mejor proporción el desarrollo socioeconómico del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- ¹ Cazar R. (16 de noviembre de 2011). *Análisis de las discapacidades en el Ecuador*. Obtenido de http://www.icevi.org/latin_america/publications/quito_conference/analisis_de_la_situacion_de_las_.html
- ² Murph, D. (11 de agosto de 2006). *Shopping cart follows you around*. Obtenido de <http://www.engadget.com/2006/08/11/b-o-s-s-shopping-cart-follows-you-around/>
- ³ Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2009). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2009-2013: Construyendo un Estado Plurinacional e Intercultural*. Objetivos nacionales para el Buen Vivir.
- ⁴ Comité Español de Automática. (2008). *Libro Blanco de la Robótica: De la Investigación al desarrollo tecnológico y futuras aplicaciones*. CEA-GTRob.
- ⁵ International Federation of Robotics. (17 de diciembre de 2012). *Service robots*. Obtenido de <http://www.ifr.org/service-robots/>
- ⁶ Educación Especial. (11 de marzo de 2010). *Discapacidad Motora*. Obtenido de <https://sites.google.com/a/cetys.net/educacion-especial/discapacidad-motora>, Español, 14 de diciembre del 2012.
- ⁷ Ministerio de vivienda del Gobierno de España. (2010). *Accesibilidad en los espacios públicos urbanizados*.
- ⁸ Yacuzzi Enrique, M. F. (2008). *QFD: Conceptos, Aplicaciones y Nuevos Desarrollos*. Universidad del CEMA.

-
- ⁹ The Engineering Toolbox. (13 de diciembre de 2012). *Fricción y coeficientes de fricción*. Obtenido de http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- ¹⁰ K.Osman N. Bojčetić y D. Marjanović. (2008). *Implementation of Modular Architecture of Cooling Generators*. Dubrovnik.
- ¹¹ Microsoft Kinect para Windows SDK v1.5.2. (10 de septiembre de 2012). *Notas de la revisión*. Obtenido de <http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=30455>
- ¹² Versallogic Corporation. (04 de marzo de 2013). *Productos*. Obtenido de <http://versallogic.com/products/ds.asp?productid=215>
- ¹³ EveryMac.com. (15 de marzo de 2013). *Especificaciones Mac Mini*. Obtenido de http://www.everymac.com/systems/apple/mac_mini/specs/mac-mini-core-i5-2.5-late-2012-specs.html.
- ¹⁴ Arduino. (15 de marzo de 2013). *Guía de introducción de Arduino*. Obtenido de <http://www.Arduino.cc/es>
- ¹⁵ MSDN. (02 de febrero de 2013). *Documentación Kinect para Windows SDK*. Obtenido de <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh855347.aspx>