



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN.**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE
APOYO PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS NO VIDENTES
USANDO EL SENSOR DE MOVIMIENTO ASUS XTION PRO
LIVE Y TECNOLOGÍA BEAGLEBONE BLACK BAJO
SOFTWARE LIBRE**

**AUTORES: PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ
DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO**

DIRECTOR: ING. EDDIE GALARZA

LATACUNGA

2016

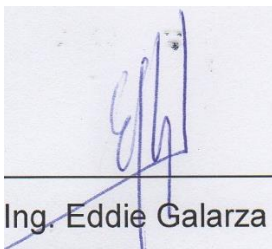


**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el proyecto de investigación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE APOYO PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS NO VIDENTES USANDO EL SENSOR DE MOVIMIENTO ASUS XTION PRO LIVE Y TECNOLOGÍA BEAGLEBONE BLACK BAJO SOFTWARE LIBRE”**, realizado por **PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ Y DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ** y al señor **DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de agosto de 2016



Ing. Eddie Galarza

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ

DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO

DECLARAMOS QUE:

El trabajo de titulación denominado “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE APOYO PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS NO VIDENTES USANDO EL SENSOR DE MOVIMIENTO ASUS XTION PRO LIVE Y TECNOLOGÍA BEAGLEBONE BLACK BAJO SOFTWARE LIBRE**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaramos que este proyecto es de nuestra autoría, en virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 03 de agosto de 2016

Patricia Alejandra Mayorga López

C.C. 1803585411

Dussan Romario Defaz Chango

C.C.0503336646



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ**

DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE APOYO PARA LA MOVILIDAD DE PERSONAS NO VIDENTES USANDO EL SENSOR DE MOVIMIENTO ASUS XTION PRO LIVE Y TECNOLOGÍA BEAGLEBONE BLACK BAJO SOFTWARE LIBRE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, 3 de agosto de 2016

Patricia Alejandra Mayorga López

Dussan Romario Defaz Chango

C.C. 1803585411

C.C.0503336646

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación se lo dedico de manera especial a mi abuelita y mi sobrina quienes son mi motivo para seguir adelante y a toda mi familia quienes son el pilar fundamental de mi vida cada día.

Patricia Mayorga

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi madre, a mi hija y a mis hermanos quienes me brindaron su apoyo incondicional durante estos años de vida universitaria.

Dussan Defaz

AGRADECIMIENTO

Ante todo, le doy gracias a Dios por haberme brindado la dicha de tener unos padres que han sido un verdadero ejemplo de dedicación, una madre de corazón que es mi ejemplo de vida y en general una familia que siempre me ha apoyado. También mi gratitud a mis amigos y las demás personas que estuvieron en los momentos felices y momentos difíciles dándome una mano.

Patricia Mayorga

Agradezco a Dios, a mi madre, a mi familia y amigos por ser quienes me acompañaron en las diversas etapas de mi vida, y que de una u otra forma me ayudaron en la consecución de mi meta de ser un profesional.

Dussan Defaz

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. BeagleBone Black.....	2
1.2.1. Descripción	2
1.2.2. Conceptos básicos.....	2
1.2.3. Manejo de BeagleBone Black	3
1.2.4. Conexiones de la tarjeta BeagleBone Black.....	4
A. Conexión a una PC mediante el cable USB.....	4
B. Escritorio independiente	4
1.2.5. Arranque de la tarjeta.....	5
1.2.6. Características y especificaciones de BeagleBone Black.....	6
1.2.7. Componentes de la tarjeta función y localización.	8
1.2.8. Estructura interna de la tarjeta BeagleBone Black	11
A. Diagrama de bloques.....	11
B. Modos de arranque	13
1.3. Cloud9 IDE (<i>Integrated Development Environment</i>).....	14
1.3.1. Descripción	14
1.3.2. Ventajas de Cloud9 IDE	15
1.4. Point Cloud Library.....	17
1.4.1. Visión artificial	17
1.4.2. Introducción a PCL.....	18

1.4.3.	Nube de puntos.....	19
1.4.4.	Principales librerías de PCL	20
1.5.	Asus Xtion Pro Live.....	21
1.5.1.	Descripción	21
1.5.2.	Especificaciones Asus Xtion Pro Live.....	23
1.5.3.	Obtención de profundidad	24
1.5.4.	Limitaciones	26
1.6.	Linux	27
1.6.1.	Descripción	27
1.6.2.	El núcleo de Linux.....	28
1.6.3.	Lenguajes de programación.....	29
1.6.4.	Características de Linux.....	29
1.6.5.	Distribuciones de GNU/Linux	29

CAPÍTULO II

	DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE DEL DISPOSITIVO.....	31
2.1.	Selección de módulos para la implementación del dispositivo.	31
2.1.1.	Selección de la tarjeta.....	31
2.1.2.	Selección de la cámara	34
2.2.	Instalación del software.....	35
2.2.1.	Instalación de drivers de la BeagleBone Black en Windows.....	35
2.2.2.	Instalación de Software en la tarjeta BeagleBone Black.....	39
2.2.3.	Instalación de PCL.....	40
A.	Requerimientos Físicos.....	40
B.	Requerimientos software	40
C.	Instalación de dependencias	40
D.	Java development Kit (JDK)	41
E.	Instalación de OpenNI.....	41
F.	Instalación de PrimeSense drivers	42
G.	Descarga e instalación de PCL	42
2.3.	Manejo de la tarjeta BeagleBone Black.....	44
2.3.1.	Prueba de funcionamiento de la tarjeta BeagleBone Black.	44
2.3.2.	PuTTY.....	47
A.	Configuración de PuTTY	48
2.4.	Enlace entre BeagleBone Black y Asus Xtion Pro Live	50

2.5.	Consideraciones de diseño	50
2.5.1.	Consideraciones del campo de visión	51
2.5.2.	Diagrama de flujo de la programación	53
2.6.	Etapas de programación	53
2.6.1.	Captura de la imagen	53
2.6.2.	Optimización de la imagen	55
A.	Eliminar Nans	55
B.	Downsampling	57
2.6.3.	Segmentación de la imagen	58
A.	Segmentación en profundidad	58
B.	Segmentación en altura	59
C.	Segmentación en el eje X	61
2.6.4.	Extracción de obstáculos identificados	61
A.	Creación del objeto de segmentación en Point Cloud Library:	62
B.	Obtención de obstáculos sobre el suelo	63
C.	Obtención de rótulos elevados	65
2.6.5.	Establecer una indicación	71
2.6.6.	Simbología	74
2.7.	Implementación del dispositivo.....	74
2.7.1	Bastón.....	75
2.7.2.	Cinturón	76

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO.....78

3.1.	Pruebas de funcionamiento y análisis de resultados	78
3.1.1.	Pruebas del campo de visión del sensor Asus Xtion Pro Live	79
3.1.2.	Pruebas de detección de presencia de obstáculos	83
A.	Presencia de obstáculos en el suelo.....	83
B.	Presencia de obstáculos elevados	84
C.	Presencia de obstáculos según la profundidad de su ubicación	85
D.	Presencia de obstáculos de diferentes materiales.....	85
E.	Presencia de obstáculos de diferentes formas.	89
F.	Presencia de obstáculos de diferentes espesores.....	92
3.1.3.	Pruebas de comportamiento ante diversos ambientes	93

A.	Ambientes interiores, a diferentes horas del día y bajo influencia de luz artificial, luz solar y ausencia de luz.	93
B.	Ambientes exteriores a diferentes horas del día, y bajo influencia de luz solar y ausencia de luz.	96
3.1.4.	Pruebas de funcionamiento del Algoritmo	99
A.	Prueba 1	99
B.	Prueba 2.....	101
C.	Prueba 3.....	103
D.	Prueba 4.....	105
E.	Análisis de resultados de las pruebas del algoritmo.....	107
3.1.5.	Pruebas de funcionamiento del dispositivo	107
A.	Pruebas realizadas con el sensor a 0.30 m del suelo.....	108
B.	Análisis de las pruebas con la cámara a 0.30 m del suelo.....	114
C.	Pruebas realizadas con el sensor a 0.60 m del suelo.....	114
D.	Análisis de las pruebas con el sensor a 0.30 m del suelo	120
E.	Pruebas realizadas con el sensor a 0.90 m del suelo.....	121
F.	Análisis de las pruebas con el sensor a 0.90 m del suelo	127
G.	Pruebas realizadas con el sensor a 1.20 m del suelo.....	128
H.	Análisis de las pruebas con el sensor a 1.20 m del suelo.	134
3.1.6.	Pruebas con personas no videntes.	135
3.2.	Comprobación de la hipótesis	140
3.2.1.	Hipótesis	140
3.2.2.	Prueba de proporciones de una muestra	140
3.3.3.	Cálculo del valor estadístico de prueba Z.....	141
3.3.4.	Cálculo de la desviación estándar de la proporción	142

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	144
4.1. Conclusiones	144
4.2. Recomendaciones	147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
ANEXOS	149
CERTIFICACIÓN.....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Conceptos básicos previos al manejo de beaglebone black.	2
Tabla 2	Led's de estado de la tarjeta beaglebone black	6
Tabla 3	Características y especificaciones de beaglebone black	7
Tabla 4	Conectores, leds e interruptores de la tarjeta beaglebone black	9
Tabla 5	Componentes clave de beaglebone black	10
Tabla 6	Especificaciones de asus xtion pro live.....	23
Tabla 7	Diferencias de hardware entre raspberry pi y beaglebone black.....	32
Tabla 8	Pines de conexión beaglebone black y raspberry pi	33
Tabla 9	Kinect Vs Asus Xtion Pro Live	34
Tabla 10	Indicaciones de posibles acciones a tomar ante la presencia de obstáculos.....	72
Tabla 11	Prueba de rango de visión de la cámara asus xtion pro live	79
Tabla 12	Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferentes materiales	88
Tabla 13	Niveles de detección de obstáculos.....	88
Tabla 14	Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferentes formas.....	91
Tabla 15	Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferente espesor	92
Tabla 16	Resultados del filtraje y detección de obstáculos en ambiente cerrado.....	95
Tabla 17	Resultados del filtraje y detección de obstáculos en ambiente externo.....	97
Tabla 18	Prueba N°1: prueba de funcionamiento del dispositivo	109
Tabla 19	Prueba N°2: prueba de funcionamiento del dispositivo	110
Tabla 20	Prueba N°3: prueba de funcionamiento del dispositivo	111
Tabla 21	Prueba N°4: prueba de funcionamiento del dispositivo	112
Tabla 22	Prueba N°5: prueba de funcionamiento del dispositivo	113
Tabla 23	Prueba N°6: prueba de funcionamiento del dispositivo	115
Tabla 24	Prueba N°7: prueba de funcionamiento del dispositivo	116
Tabla 25	Prueba N°8: prueba de funcionamiento del dispositivo	117
Tabla 26	Prueba N°9: prueba de funcionamiento del dispositivo	118
Tabla 27	Prueba N°10: prueba de funcionamiento del dispositivo	119
Tabla 28	Prueba N°11: prueba de funcionamiento del dispositivo	122
Tabla 29	Prueba N°12: prueba de funcionamiento del dispositivo	123
Tabla 30	Prueba N°13: prueba de funcionamiento del dispositivo	124
Tabla 31	Prueba N°14: prueba de funcionamiento del dispositivo	125
Tabla 32	Prueba N°15: prueba de funcionamiento del dispositivo	126
Tabla 33	Prueba N°16: prueba de funcionamiento del dispositivo	128
Tabla 34	Prueba N°17: prueba de funcionamiento del dispositivo	130
Tabla 35	Prueba N°18: prueba de funcionamiento del dispositivo	131
Tabla 36	Prueba N°19: prueba de funcionamiento del dispositivo	132
Tabla 37	Prueba N°20: prueba de funcionamiento del dispositivo	133
Tabla 38	Pruebas del dispositivo con personas con discapacidad visual ..	135

Tabla 39 Resultados generales de pruebas del dispositivo con personas con discapacidad visual	138
Tabla 40 Pruebas con personas con discapacidad visual	141
Tabla 41 Tabla z	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tarjeta BBB, Cable USB y tarjeta de instrucciones.	3
Figura 2 Conexión de la tarjeta BeagleBone Black a una PC mediante el cable USB.	4
Figura 3 Configuración independiente BBB	5
Figura 4 Arranque de BeagleBone Black	6
Figura 5 Conectores, Leds e interruptores de BeagleBone Black	8
Figura 6 Componentes clave de BeagleBone Black.....	10
Figura 7 Nombres de los pines de la tarjeta BeagleBone Black.	11
Figura 8 Componentes clave de la tarjeta BeagleBone Black	12
Figura 9 CLOUD9 IDE	15
Figura 10 Panel de control CLOUD9 IDE	16
Figura 11 Proyecto en CLOUD9 IDE.....	16
Figura 12 Espacio de trabajo en CLOUD9 IDE	17
Figura 13 Nube de puntos.....	19
Figura 14 Librerías de código	21
Figura 15 Asus Xtion Pro Live.....	21
Figura 16 Detección de cuerpos	22
Figura 17 Asus Xtion PRO LIVE	23
Figura 18 Patrón infrarrojo emitido.....	25
Figura 19 Malla de puntos infrarrojo.....	25
Figura 20 Proyección de sombra.	27
Figura 21 Linux	27
Figura 22 Escritorio de la Distribución DEBIAN.....	30
Figura 23 Iconos correspondientes a BBB y RaspBerry PI.	31
Figura 24 Dispositivo de la tarjeta BeagleBone Black en el explorador de Windows.	36
Figura 25 Carpeta contenedora de los drivers de la tarjeta BeagleBone Black.....	36
Figura 26 Carpeta contenedora de los drivers de la tarjeta BeagleBone Black para Windows.....	37
Figura 27 Drivers para Windows 64 bits.....	37
Figura 28 Asistente para la instalación de controladores de dispositivos. ...	38
Figura 29 Pantalla de Finalización de la instalación.	38
Figura 30 Ventana de archivos imágenes de la distribución “Ubuntu” para BeagleBone Black.....	39
Figura 31 Ventana para el uso de Ubuntu Image Writer.	40
Figura 32 Dependencias para PCL	43
Figura 33 Ventana beagleboard.org.....	44
Figura 34 Pantalla donde se encuentra el Link Cloud9 IDE	45
Figura 35 Interfaz de Cloud9 IDE	45
Figura 36 Selección de lenguaje de programación.....	46
Figura 37 Opción “Run This File” para compilar.	46
Figura 38 Icono que ejecuta el código.....	47
Figura 39 Ventana de configuración de PuTTY.....	49
Figura 40 Ventana de programación y acceso a la ayuda de PuTTY.....	49

Figura 41	Lista de dispositivos en BBB	50
Figura 42	Sistemas de coordenadas del sensor	51
Figura 43	Campo de visión con ASUS a 1.7 m del suelo.	51
Figura 44	Campo de visión del sensor ASUS XTION PRO LIVE a una altura de 0.6 m	52
Figura 45	Diagrama de flujo.....	53
Figura 46	Imagen capturada con ASUS XTION PRO LIVE.....	54
Figura 47	Imagen capturada por ASUS XTION PRO LIVE	55
Figura 48	Imagen con Nans.....	56
Figura 49	Imagen sin Nans	57
Figura 50	Efecto downsampling.....	57
Figura 51	Imagen original	59
Figura 52	Imagen segmentada en profundidad a 1.60 m	59
Figura 53	Imagen original	60
Figura 54	Imagen segmentada en altura [-0.2. a 0.9 m].....	60
Figura 55	Imagen segmentada en el eje X [-0.8 a 0.8 m].....	61
Figura 56	Imagen aplicado SACSegmentation.....	63
Figura 57	Imagen seccionada para su procesamiento	71
Figura 58	Channel Sound 7.1	72
Figura 59	Imagen capturada con Point Cloud Library	73
Figura 60	Imagen filtrada y seccionada.....	73
Figura 61	Salida de respuesta escrita.....	74
Figura 62	Bastón.....	75
Figura 63	Valores calculados del campo de visión a 0.5 m de distancia de la cámara al obstáculo	79
Figura 64	Valores medidos del campo de visión a 0.5 m de distancia de la cámara al obstáculo	80
Figura 65	Rango de visión frontal de Asus a 0.5 m del sujeto.....	80
Figura 66	Rango de visión lateral de Asus a 0.5 m del sujeto	81
Figura 67	Rango de visión frontal de Asus a 1.5 m del sujeto.....	81
Figura 68	Rango de visión lateral de Asus a 1.5 m del sujeto	82
Figura 69	Rango de visión frontal de Asus a 2.5 m del sujeto.....	82
Figura 70	Rango de visión lateral de Asus a 2.5 m del sujeto	83
Figura 71	Filtraje y detección de obstáculos a nivel del suelo	83
Figura 72	Filtraje y detección de obstáculos elevados	84
Figura 73	Filtraje y detección de obstáculos a diferentes profundidades.....	85
Figura 74	Filtraje y detección de obstáculos de diferentes materiales.....	87
Figura 75	Porcentaje de detección según el material del obstáculo	89
Figura 76	Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos de diferentes materiales	90
Figura 77	Porcentaje de detección según la forma del obstáculo.....	91
Figura 78	Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos de diferente espesor	92
Figura 79	Porcentaje de detección según el espesor del obstáculo	93
Figura 80	Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos en ambiente cerrado (habitación)	94
Figura 81	Porcentaje de detección en ambientes interiores	95

Figura 82	Pruebas de filtraje de obstáculos en ambiente externo	97
Figura 83	Porcentaje de detección en ambientes exteriores	98
Figura 84	Prueba 1: funcionamiento del algoritmo	101
Figura 85	Prueba 2: funcionamiento del algoritmo	103
Figura 86	Prueba 3: funcionamiento del algoritmo	105
Figura 87	Prueba 4: funcionamiento del algoritmo	107
Figura 88	Tiempo de respuesta con el sensor a 0.30 m del suelo.....	114
Figura 89	Tiempo de respuesta con el sensor a 0.60 m del suelo.....	120
Figura 90	Tiempo de respuesta con el sensor a 0.90 m del suelo.....	127
Figura 91	Tiempo de respuesta con el sensor a 1.20 m del suelo.....	134
Figura 92	Distribución normal	142

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Plano normal	62
Ecuación 2 Constante p	62
Ecuación 3 Forma normal del plano	62
Ecuación 4 Prueba Z	140
Ecuación 5 Desviación estándar de la proporción	142

RESUMEN

El siguiente proyecto tiene como propósito el diseño e implementación de un dispositivo de apoyo para la movilidad de personas no videntes usando el sensor de movimiento Asus Xtion Pro Live y tecnología BeagleBone Black bajo software libre, mismo que tiene como objetivo presentar de forma escrita y auditiva el posible camino a escoger por el usuario dependiendo de la presencia o ausencia de obstáculos en el camino. La tarjeta BeagleBone Black, se inicia desde una micro-SD de 16 Gb previamente cargada con el sistema operativo Ubuntu Xenial para ARM, y se alimenta mediante una conexión USB a una computadora portátil. Para acceder al sistema operativo de Linux desde el que se inicializa a la tarjeta BeagleBone Black, estando en Windows se emplea el programa PuTTY, que es un cliente SSH; una vez accedido a Linux se instala el programa Point Cloud Library (PCL) que es una librería multiplataforma de software abierto que permite recibir información de sensores como Asus, PCL está dividido en submódulos para diferentes tópicos, como filtros, visualización, segmentación, registro, búsqueda, estimación, etc. y se convierte en una de las soluciones más viables de software para el procesamiento 3D. El sensor Asus Xtion Pro Live es el encargado de capturar la imagen tridimensional del ambiente, esta imagen se carga en la tarjeta BeagleBone Black para su procesamiento, mientras que el algoritmo desarrollado se programó en lenguaje C++ utilizando las librerías propias de Point Cloud Library. Además de ello para la salida auditiva se emplea la tarjeta de sonido 7.1 Channel Sound y se la configura para su reconocimiento en la BeagleBone Black, se usa un par de audífonos como interfaz con el usuario, se cuenta con cuatro tonos a diferente frecuencia y duración para distinguir cada una de las salidas de respuesta.

PALABRAS CLAVE:

- **GUIA A PERSONAS CIEGAS**
- **TARJETA BEAGLEBONE BLACK**
- **PROCESAMIENTO DE IMÁGENES 3D**
- **SOFTWARE POINT CLOUD LIBRARY**

ABSTRACT

The following project aims to design and to implement a support device for the mobility of blind people using Asus Xtion Pro Live motion sensor and a BeagleBone Black technology under free software which aims to indicate in written and visual fashion the possible path that has to be chosen by the user depending on the presence or absence of obstacles in the way. The BEAGLEBONE Black card boots from a 16 GB micro-SD preloaded with Ubuntu Xenial operating system for ARM, and is connected to a laptop using a USB port. To access the Linux operating system from which the BeagleBone Black is booted from Windows we use PuTTY program, which is an SSH client. Once accessed to Linux, the Point Cloud Library Program (PCL) is installed, this is a multiplatform library of open source software that allows receiving information from sensors such as Asus. PCL is divided into sub-modules for different that makes different functions, such as filtering, visualizing, segmenting, registering, estimation, searching, etc. and it becomes one of the most viable solutions for 3D rendering software. Asus Xtion Pro Live sensor is responsible for capturing the three-dimensional image of the environment, these images are loaded into the BeagleBone Black card for processing: The developed algorithm was programmed in C ++ language using Point Cloud Library's libraries. Moreover for the output sound, a 7.1 Channel Sound card is used and it is configured for its recognition in the BeagleBone Black Card, a pair of headphones is used as the user interface, there are four tones at different frequency times to distinguish each of the output response.

KEYWORDS:

- **BLIND GUIDANCE**
- **TARGET BEAGLEBONE BLACK**
- **3D IMAGE PROCESSING**
- **SOFTWARE POINT CLOUD LIBRARY.**

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Introducción

La implementación de un dispositivo de apoyo para la movilidad de personas no videntes es indispensable ya que para ellas, moverse dentro de sus hogares es una tarea relativamente sencilla al ser un espacio conocido y adaptado para su desenvolvimiento, mientras que hacerlo fuera de la misma se transforma en una tarea realmente compleja, puesto que se debe tener en consideración que las ciudades y sus alrededores no cuentan con servicios que faciliten o permitan a personas con discapacidad visual caminar y desenvolverse con facilidad, por lo cual una tarea cotidiana se convierte en una actividad de alto riesgo, que afecta directamente a su seguridad e integridad física.

Razón por la cual se debe implementar un dispositivo de apoyo el cual les permita moverse de un lugar a otro con autonomía y confianza, al reducir el riesgo de accidentes mediante indicaciones de los desniveles del suelo, los obstáculos o posibles riesgos físicos existentes en el trayecto en tiempo real incrementando sus posibilidades de una mejor calidad de vida, por lo cual en este capítulo se detalla toda la información necesaria para elaborar el proyecto así como la investigación referente a la nueva tecnología BEAGLEBONE BLACK que se utiliza, el módulo ASUS XTION PRO LIVE adquirido y la respectiva programación y manejo que estos equipos necesitan, con esto se facilita la comprensión y el entendimiento de cada dispositivo a emplearse.

Además, con éste trabajo se fortalece la investigación de los nuevos dispositivos que podrán ser utilizados en futuros proyectos con los que se incentiva el desarrollo de nuevas tecnologías, ya que es prioridad actualizar

los conocimientos y aplicarlos en diferentes proyectos especialmente aquellos direccionados a mejorar la calidad de vida de los seres humanos.

1.2. BeagleBone Black

1.2.1. Descripción

BeagleBone Black fue diseñada por Gerald Coley, es la última edición de la familia BeagleBoneBoard.org diseñada con un procesador ARM Cortex-A8, para desarrolladores que buscan experimentar con la creación de su propio software y hardware, además de permitir el acceso a diferentes interfaces y la adición de tarjetas complementarias llamadas capas en diferentes combinaciones y circuitos independientes.

1.2.2. Conceptos básicos

El manejo de tarjetas como BeagleBone Black requiere la comprensión de términos comúnmente usados para evitar confusiones y posibles dudas (Giometti, 2015).

TABLA 1

Conceptos básicos previos al manejo de BeagleBone Black.

Término	Descripción
Target	Es la computadora embebida que se desea manejar, usualmente es una plataforma ARM, pero no es una regla.
Host	Un host es el computador que se usa para manejar el sistema target, comúnmente es una PC normal (plataforma x86).
Serial Console	Es el puerto de comunicación más importante en un sistema embebido.

CONTINÚA 

Native compiler	Es un compilador que corre en una máquina (target o host) que construye el código para la máquina.
Cross- compiler	Es el compilador que genera el código para una plataforma externa.

Fuente: (Giometti, 2015)

1.2.3. Manejo de BeagleBone Black

BeagleBone Black es una tarjeta de desarrollo de bajo costo, para desarrolladores y aficionados. Permite manejarse con Linux o Windows con solo una conexión a través de un cable USB.

En la figura 1 se encuentran los tres elementos principales, que se obtienen al adquirir una tarjeta BeagleBone Black.

- Tarjeta BeagleBone Black.
- Cable mini-USB a USB tipo A.
- Instrucciones



Figura 1 Tarjeta BBB, Cable USB y tarjeta de instrucciones.

Fuente: (beagleboard.org, 2016)

1.2.4. Conexiones de la tarjeta BeagleBone Black

La tarjeta puede ser configurada de varias maneras diferentes, sin embargo, las más importantes son (Allison, 2016):

A. Conexión a una PC mediante el cable USB

En esta configuración la tarjeta es alimentada por la computadora a través del cable USB y se accede a ella como una unidad de almacenamiento USB a través del navegador; se requerirá usar Firefox o Chrome en el computador, ya que IEX no lo hará funcionar correctamente. Mediante esta configuración se tiene:

- Acceso a la tarjeta como una unidad de almacenamiento.
- Conexión independiente Ethernet RNDIS.

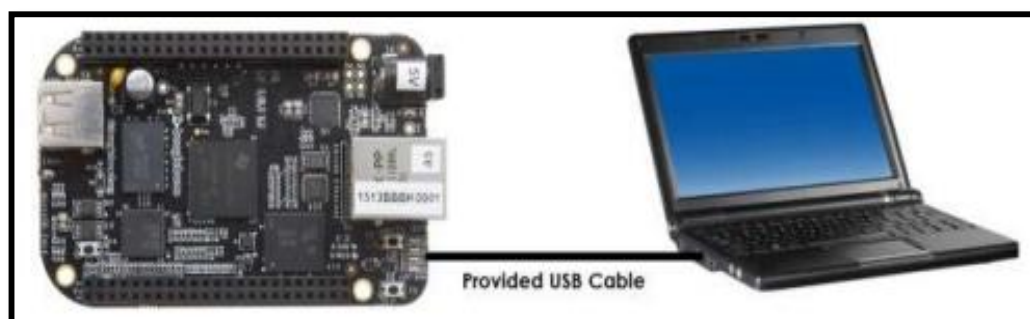


Figura 2 Conexión de la tarjeta BeagleBone Black a una PC mediante el cable USB.

Fuente: (Allison, 2016)

En algunos casos la computadora no es capaz de suministrar toda la energía requerida por la tarjeta, por lo cual se puede requerir de una fuente de alimentación externa de 5 VDC.

B. Escritorio independiente

En esta configuración la tarjeta funciona más como una PC, totalmente libre de cualquier conexión con una computadora como se muestra en la figura 3,

permite crear códigos para lo que se requiera hacer, sin embargo, requerirá ciertos accesorios de una PC común como:

- 1 fuente de poder de 5VDC
- Monitor HDMI (si se requiere manejo de audio) o un DVI-D con un adaptador.
- 1 cable HDMI
- 1 teclado y un mouse Wireless
- Hub USB (opcional)

Opcionalmente se puede usar un cable Ethernet para acceder.



Figura 3 Configuración independiente BBB

Fuente: (Allison, 2016)

1.2.5. Arranque de la tarjeta

Al energizar la tarjeta ésta arranca, y los leds mostrados se encenderán en la secuencia mostrada en la figura 4, se requieren unos pocos segundos para este proceso. Linux arranca en el momento en que los leds empiezan a parpadear de forma errática.

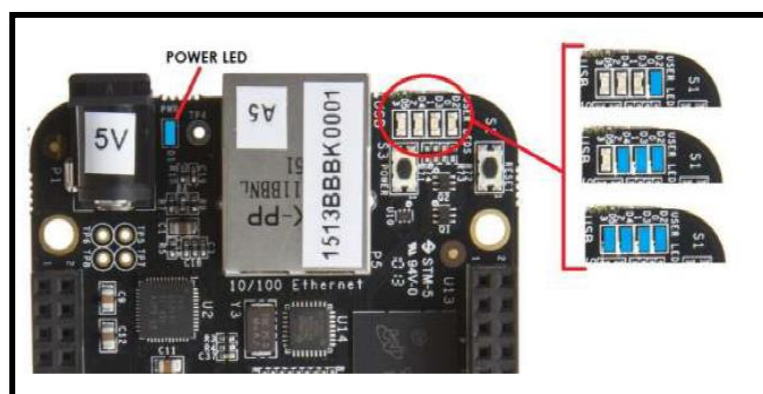


Figura 4 Arranque de BeagleBone Black

Fuente: (Allison, 2016)

TABLA 2

Led's de estado de la tarjeta BeagleBone Black

LEDS DE ESTADO EN EL ARRANQUE DE LA TARJETA	
LEDS	ESTADO
USER 0	Indica el arranque del Kernel de Linux.
USER 1	Acceso a la tarjeta SD.
USER 2	Indicador de actividad, cuando el Kernel no está en el bloque inactivo.
USER 3	Indica acceso a eMMC.

Fuente: (Allison, 2016)

Como se muestra en la tabla 2 cada uno de los cuatro leds de estado muestran diferentes procesos necesarios para el arranque de la BeagleBone Black desde el arranque del kernel, acceso a la tarjeta SD y acceso a eMMC.

1.2.6. Características y especificaciones de BeagleBone Black

En la tabla 3 se enuncian las principales especificaciones y características de la tarjeta:

TABLA 3

Características y especificaciones de BeagleBone Black

CARACTERÍSTICAS		
Procesador	Sitara AM3359AZCZ100, 1GHz, 2000 MIPS	
Tarjeta gráfica	SGX530 3D, 20M Polygons/S	
Memoria SDRAM	512MB DDR3L 606MHZ	
Flash de la tarjeta	2GB, MMC embebido de 8 bit	
PMIC	Regulador TPS65217C PMIC y un adicional LDO.	
Soporte de depuración	20-pin CTI JTAG, Serial Header	
Fuentes de energía	Mini-USB, USB O conector Dc	Expansión externa de 5V DC
PCB	3.4" x 2.1"	6 capas
Indicadores	1-Energía, 2-Ethernet, 4- LEDs controlables por el usuario	
Puerto HS USB 2.0	Acceso a USB0	
HS USB 2.0 Host Port	Acceso a USB1, enchufe tipo A, 500mA LS/FS/HS	
Puerto serial	UART0 accesible mediante el pin 6, 3.3V TTL	
Ethernet	10/100, RJ45	
Conector SD/MMC	Tarjeta micro-SD, 3.3V	
Entrada de usuario	Botón de reseteo Botón de arranque Botón de encendido	
Salida de video	16b HDMI, 1280x1024 (MAX) 1024x768, 1280x720, 1440x900	

CONTINÚA 

	Soporte w/EDID
Audio	Interfaz HDMI, Estéreo
Conectores de expansión	Fuente de 5V, 3.3V, VDD_ADC(1.8V) 3.3 V entrada/salida Mc ASP0, SPI1, I2C, GPIO (65), LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN (1.8V MAX), 4 Temporizadores, 3 puertos seriales, CAN0, EHRPWM, Interruptor XDMA, botón de encendido, Tarjeta de expansión ID
Peso	39.68 gramos

Fuente: (Allison, 2016)

1.2.7. Componentes de la tarjeta función y localización.

Esta sección describe los principales componentes físicos de BeagleBone Black detallando su función y localización en la tarjeta.

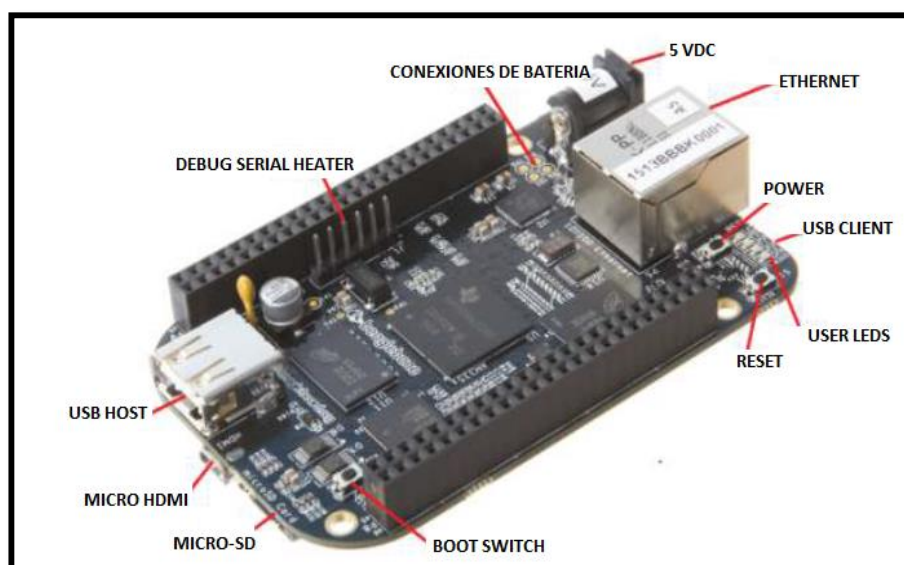


Figura 5 Conectores, Leds e interruptores de BeagleBone Black

Fuente: (Allison, 2016)

TABLA 4

Conectores, Leds e interruptores de la tarjeta BeagleBone Black

CONECTORES - LEDS – INTERRUPTORES	
Fuente DC	Entrada de energía (5 VDC)
Power Button	Alerta al procesador del inicio del proceso de apagado
10/100 Ethernet	Conexión a LAN
Serial Debug	Puerto de depuración serial
USB Client	Conexión mini-USB a PC que puede energizar la tarjeta
BOOT switch	Puede ser usada para forzar un Boot de la tarjeta SD
LEDS	Son 4 Leds azules que pueden ser utilizados por el usuario
Reset Button	Permite al usuario resetear el procesador
uSD	Es donde una tarjeta uSD puede ser instalada
microHDMI	Es donde se conecta el display
USB Host	Pueden ser conectadas diferentes interfaces USB tales como Wi-Fi, BT, Keyboard, etc.

Fuente: (Allison, 2016)

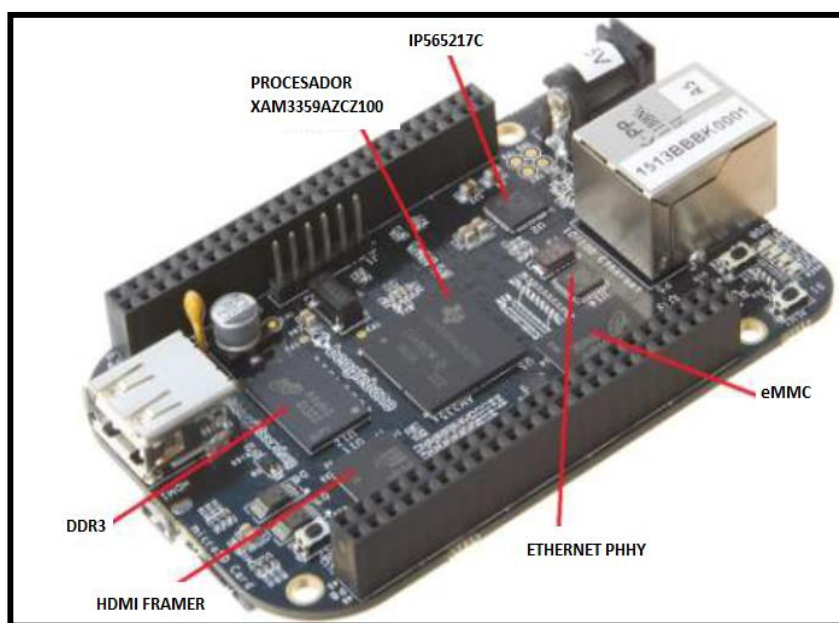


Figura 6. Componentes clave de BeagleBone Black

Fuente: (Allison, 2016)

TABLA 5

Componentes clave de BeagleBone Black

COMPONENTES	DESCRIPCIÓN
Sitara AM3359AZCZ100	Es el procesador de la tarjeta
Micron 512MB DDR3L	Es la memoria RAM Data Dual Rate
TPS65217C PMIC	Provee de energía a varios componentes de la tarjeta.
SMSC Ethernet PHY	Es la interfaz física para la red
Micron eMMC	Es un chip MMC que sostiene 2 GB de información
HDMI frame	Provee control para un HDMI o pantalla DVI-D con un adaptador

Fuente: (Allison, 2016)

1.2.8. Estructura interna de la tarjeta BeagleBone Black

Esta sección detalla la estructura de la tarjeta BeagleBone Black, útil para interconexión, escritura de dispositivos o para modificar especificaciones del diseño.

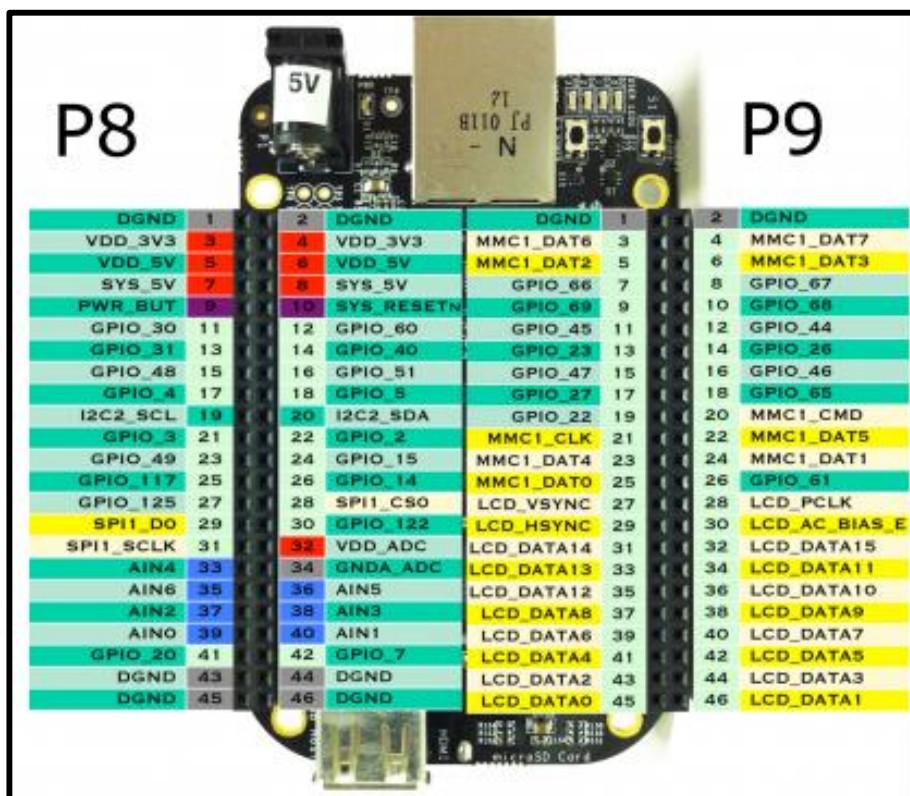


Figura 7. Nombres de los pines de la tarjeta BeagleBone Black.

Fuente: (Allison, 2016)

A. Diagrama de bloques

La figura 8 muestra el diagrama de bloques de alto nivel de la tarjeta BeagleBone Black.

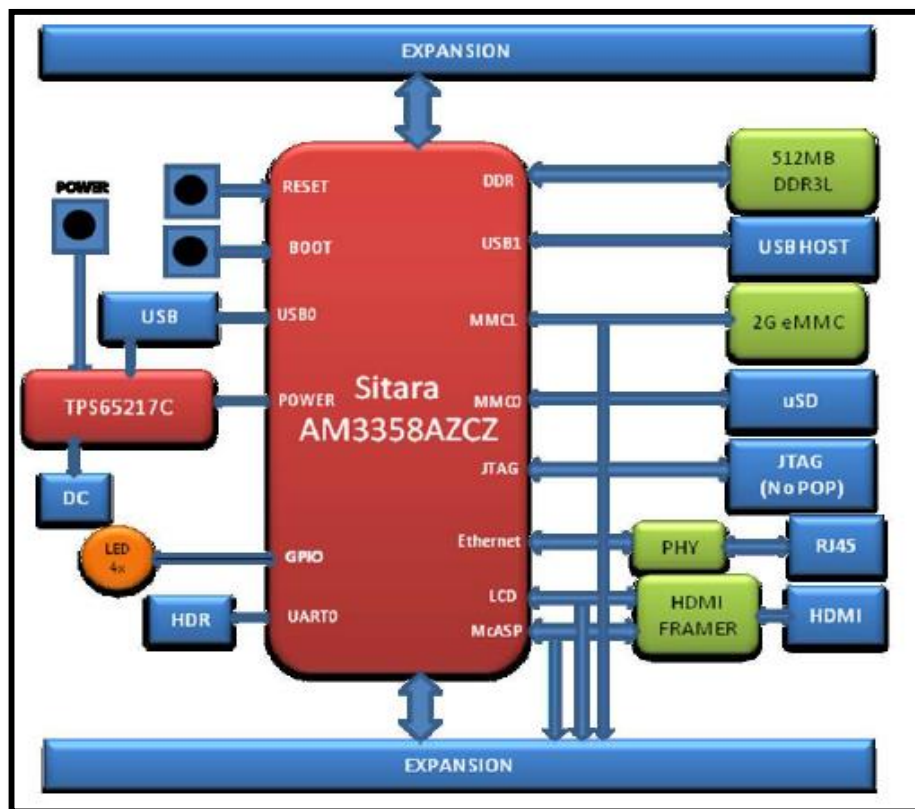


Figura 8 Componentes clave de la tarjeta BeagleBone Black

Fuente: (Allison, 2016)

- *Procesador*

La tarjeta usa un procesador Sitará XAM3359AZCZ en el paquete 15x15 además usa la versión 2.0 con algunas mejoras en este procesador en comparación con la versión original de BeagleBone. Dos características importantes del procesador incluyen:

- Operación de 1GHZ
- RTC fix
- *Memoria*

La tarjeta consta de tres memorias.

- *512MB DDR3L*

Usa una memoria de 256Mb x16 DDR3L 4Gb (512MB), la memoria usada es la MT41K512M16HA-125 de Micron, Esta será operada a una frecuencia

de reloj de 303 MHz rindiendo un rango efectivo de 606 MHz en el bus DDR3L permitiendo 1.32GB/S de ancho de banda de memoria DDR3L.

- *32KB EEPROM*

Consta de una EEPROM sobre I2C0 que mantiene la información de la tarjeta, esta información incluye nombre de la tarjeta, número serial, e información de revisión. Tiene un punto de prueba que permite al dispositivo ser programado y otras veces protección contra escritura.

- *2GB Embedded MMC*

El dispositivo conectado al puerto MMC1 del procesador permite un acceso de 8 bits.

MMC0 no puede ser usado en modo de 8 Bit porque los pines más bajos están localizados en los pines usados por el puerto Ethernet, si bien no interfiere con el funcionamiento de la tarjeta SD pero lo vuelve inutilizable como un puerto eMMC de 8 Bit.

- *Micro SD conector*

La tarjeta está equipada con un conector microSD que actúa como un arranque secundario de la tarjeta, o si se selecciona como arranque primario.

B. Modos de arranque

Los modos de arranque de la tarjeta son:

- *Arranque eMMC*

Es el modo de arranque predeterminado

- *Arranque SD*

Este modo será arrancado desde el slot uSD, se puede usar para anular lo que está en el dispositivo eMMC y puede ser usado para programar el eMMC.

- *Arranque Serial*

Este modo usará el puerto serial para permitir descargar el software directamente. Un cable USB – Serial será requerido para usar este puerto.

- *Arranque USB*

Este modo soporta arranque sobre el puerto USB.

Se tiene un switch para permitir cambiar entre modos (Allison, 2016).

1.3. Cloud9 IDE (*Integrated Development Environment*)

1.3.1. Descripción

Es un entorno de desarrollo online que permite administrar un servidor virtual y editar código, este programa se inicializa en el navegador con las mismas características y funcionalidades de un IDE, en un entorno real, autónomo y configurable al gusto del usuario para la ejecución de programas, asigna recursos para crearlos y testarlos, en el formato VPS (Alvarez, 2016).

Cloud9 IDE es gratuito, brinda la posibilidad de almacenar código y desarrollar archivos pudiendo modificarlos directamente por lo que cualquier cambio se actualiza al instante en el sitio web que se produce en C9, esto elimina la necesidad de subir ficheros.

El editor posee un navegador que permite realizar pruebas sin salir de la aplicación además de brindar las siguientes ventajas:

- **No requiere configuración:** Sólo se necesita crear un usuario y ya se puede disponer de un servidor bajo los lenguajes de programación más comunes.
- **Pruebas realistas:** Los códigos pueden ser probados mediante un dominio de internet.
- **Compartir datos:** Se puede compartir información de forma didáctica.
- **Trabajar desde cualquier ordenador:** No se necesita la instalación de un software en el ordenador, sin necesidad de poseer una conexión a internet sino simplemente un navegador para poder trabajar.

Se dispone de la consola de comandos del servidor, y la consola Linux, que brindan la apertura a la instalación de todo tipo de aplicaciones, extensiones, etc, lo que permite familiarizarse con comandos del terminal para mejorar el flujo de trabajo.

Para la edición de código se cuenta con ayudas contextuales inteligentes, opciones para personalizar el editor, multitarea ya que se puede gestionar varios archivos al mismo tiempo, depurador de código, permite visualizar código en marcha, tener histórico de archivos y muchas otras funcionalidades extra (Alvarez, 2016).

Al momento de ejecutar un archivo se puede ver su funcionamiento de inmediato en el servidor. Además de que no se requiere la instalación de Apache, PHP, NodeJS, Ruby, Python (Alvarez, 2016).



Figura 9 CLOUD9 IDE

Fuente: (Nina, 2016)

1.3.2. *Ventajas de Cloud9 IDE*

Entre las principales ventajas de Cloud9 IDE se pueden tener en cuenta las siguientes:

- Permite acceder a cuentas GitHub y BitBucket
- Se puede editar en lenguajes como HTML, CSS, PHP, Java, etc.
- El trabajo puede ser colaborativo.
- Los códigos se pueden mantener en la nube (Internet), permitiendo acceder a ellos desde cualquier computador con acceso a Internet.

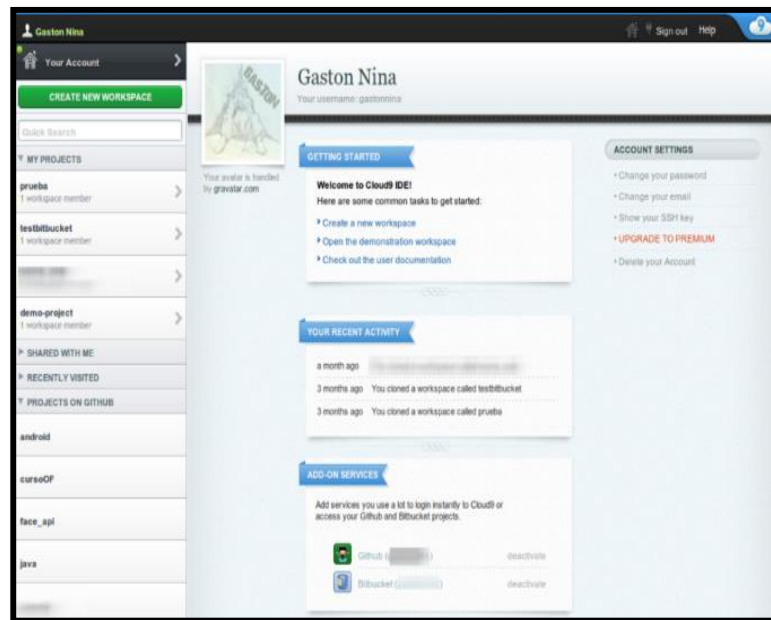


Figura 10 Panel de control CLOUD9 IDE

Fuente: (Nina, 2016)

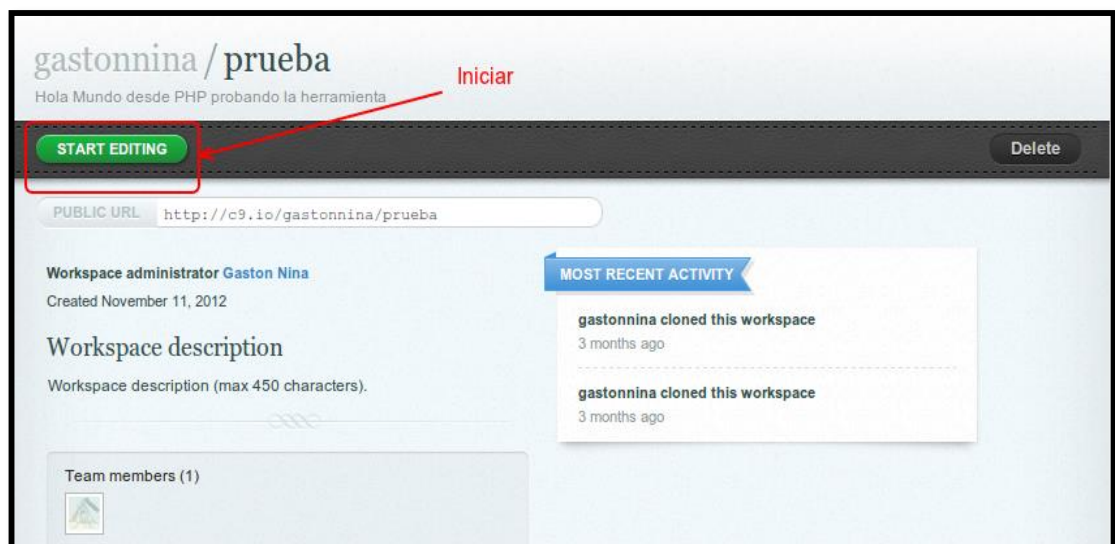


Figura 11 Proyecto en CLOUD9 IDE

Fuente: (Nina, 2016)

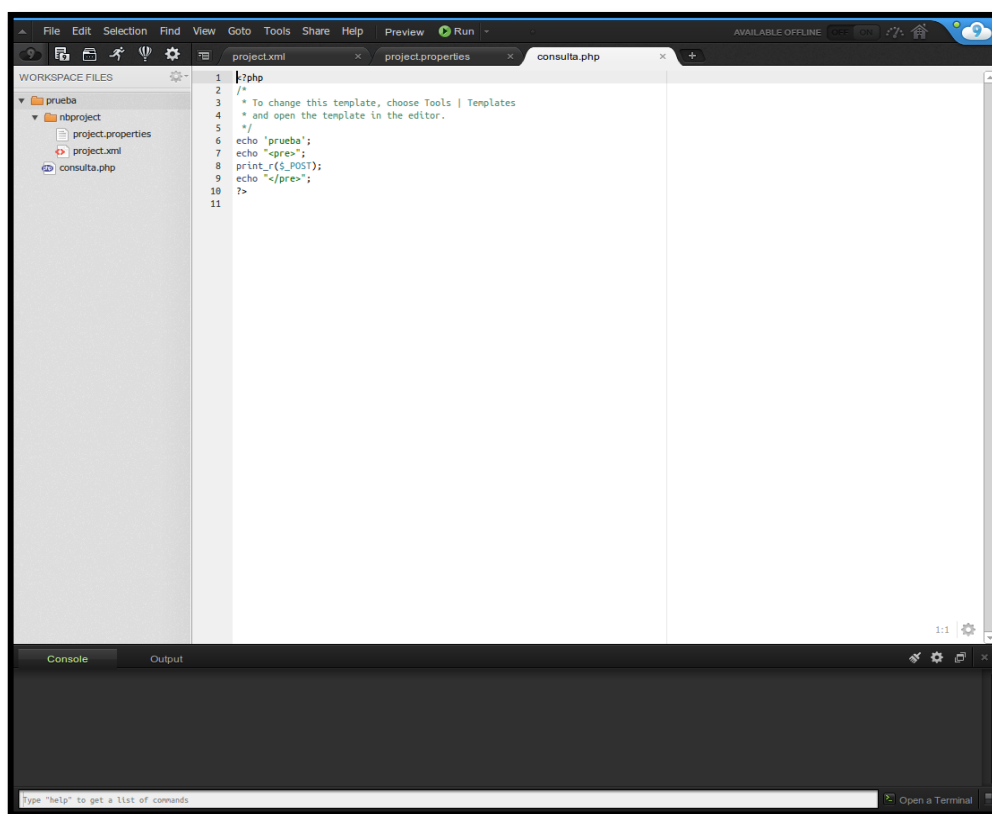


Figura 12 Espacio de trabajo en CLOUD9 IDE

Fuente: (Nina, 2016)

En la figura 10 se muestra el panel de control de CLOUD9 IDE desde el cual se puede tener acceso a la creación de nuevos proyectos, proyectos en GitHub, proyectos recientes, etc; como se indica en la figura 11 para inicializar un proyecto se tiene una pantalla didáctica y fácil de manejar y finalmente se puede acceder al espacio de trabajo en Cloud9 IDE (figura 12).

1.4. Point Cloud Library

1.4.1. Visión artificial

El campo de la visión artificial ha ido avanzando de manera exponencial en los últimos años y se ha convertido en una de las principales herramientas aplicadas en la robótica, está enfocada al desarrollo de aplicaciones en tiempo real que permitan crear proyectos que asemejen las habilidades de la visión humana por percepción y comprensión de una imagen.

El campo de la visión artificial se compone de métodos de adquisición, procesamiento, análisis, y comprensión de imágenes, es decir, adquirir información gráfica del entorno real para generar información numérica y simbólica para tener una descripción del mundo que pueda ser interpretada y utilizada para interactuar con el mismo.

Y es exactamente esa la función de Asus Xtion Pro Live ya que al poseer una cámara con un sensor de profundidad desarrollado con tecnología PrimeSense, basado en un método de luz infrarroja estructurada y con una cámara normal (dispositivo RGB-D), y un micrófono, se lo puede asociar a una computadora como cualquier otro sensor y ser empleado para cualquier tipo de aplicación imaginable, permitiendo, como se explica en el apartado anterior, la detección de objetos, expresiones faciales, distancia de obstáculos, etc, todo esto posible gracias a PCL y OpenNI drivers.

Asus Xtion Pro Live retorna información 3D en forma de point clouds, que no son otra cosa que un conjunto de puntos en un espacio tridimensional, cada uno de los cuales posee sus propias coordenadas XYZ, cada punto corresponde exactamente a un pixel de la imagen recibida, además de ello se puede tener información sobre el color ya que se cuenta con una cámara RGB, los “point clouds” pueden ser transformados en mallas tridimensionales o simplemente procesados con el conjunto original de datos.

1.4.2. Introducción a PCL

Durante mucho tiempo la visión artificial estuvo enfocada a cámaras 2D, es decir, a la manipulación de la imagen RGB de una escena, y manipulando digitalmente para ubicar un objeto, rotar, escalar, o retornar datos de movimiento de un video, sin embargo, actualmente se tiene a disposición librerías como OpenCV, ROS, y PCL que integran el uso de sensores 3D, permitiendo no solo el reconocimiento de objetos sino la determinación de parámetros como distancia y movimiento en tiempo real.

Este proyecto iniciado en el 2010 por Willow Garage, lanzó su primera versión completa en 2011, es uno de los principales competidores de OpenCV y ROS.

PCL es una de las soluciones para el procesamiento 3D y point cloud, es una librería multiplataforma de software abierto que permite recibir información de sensores como Asus y se divide en submódulos para diferentes tópicos, como filtros, visualización, segmentación, registro, búsqueda, estimación, etc. Al dar la posibilidad de “ver” el ambiente y enfocarla a la ayuda de personas no videntes se convierte no solo en un avance tecnológico aislado sino en un avance directo para una parte importante de la sociedad.

1.4.3. Nube de puntos

Una nube de puntos es una estructura de datos utilizada para representar una colección de puntos multidimensionales y se utiliza comúnmente para representar los datos en tres dimensiones. En una nube de puntos 3D, los puntos por lo general representan los ejes X, Y y Z coordenadas geométricas de una superficie muestreada subyacente. Cuando la información de color está presente (ver la figura 13), la nube de puntos se convierte en 4D.



Figura 13 Nube de puntos

Fuente: (PCL, 2016)

Las nubes de puntos se pueden adquirir a partir de sensores como cámaras estéreo, escáneres 3D, cámaras de tiempo de vuelo o generados a partir de

un programa de ordenador de forma sintética. PCL admite de forma nativa las interfaces OpenNI 3D, por lo que puede adquirir y procesar datos de dispositivos tales como las cámaras PrimeSensor 3D, el Kinect de Microsoft, o el Asus Xtion Pro.

1.4.4. Principales librerías de PCL

PCL está estructurado por varias librerías independientes, entre las principales se tiene (PCL, 2016):

- Features
- Filters
- Keypoints
- Registration
- Segmentation
- Sample Consensus
- Surface
- Range Image
- I/O
- People
- Simulation
- Out-of-core
- Visualization
- Segmentation
- 2D
- ML
- Recognition
- Kdtree
- Octree

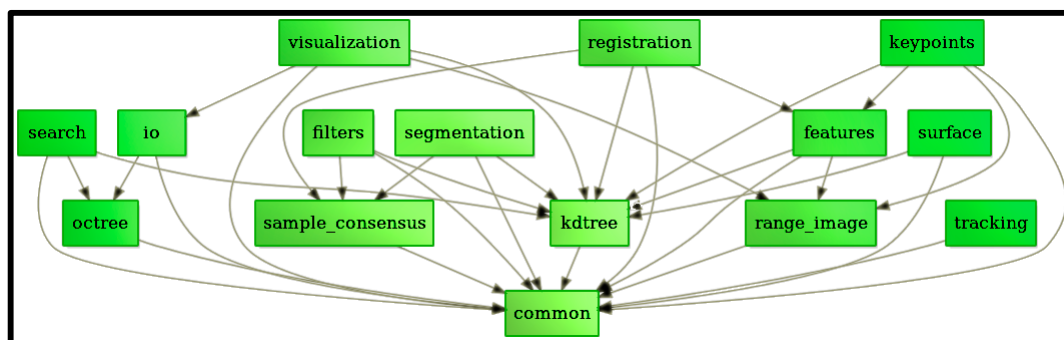


Figura 14 Librerías de código

Fuente: (PCL, 2016)

1.5. Asus Xtion Pro Live

1.5.1. Descripción



Figura 15 Asus Xtion Pro Live

Fuente: (Asus, 2016)

Xtion Pro Live permite a desarrolladores crear nuevas aplicaciones para juegos, industria, educación, medicina, etc. Es totalmente abierto, facilita el manejo de aplicaciones basadas en movimiento, mediante el uso de herramientas propias sin requerir de complicados algoritmos, por lo cual es simple e intuitivo; incluye un puerto USB además de ser compatible con OpenNI NiTE que es uno de los más robustos y avanzados software para visión 3D por computadora.

Además, este dispositivo utiliza un sensor infrarrojo para la detección de la profundidad, el color y sonido que permite percibir los movimientos del usuario en tiempo real y la voz de los usuarios con más precisión.

– *Detección de gestos*

Se pueden usar las manos como controladores, ya que su movimiento es detectado en tiempo real sin retrasos significativos, pudiendo utilizarlas para movimientos circulares, empujar, realizar ondas o seleccionar, etc. Lo cual es una de sus mayores ventajas como interfaz en cualquier aplicación.

– *Detección del cuerpo entero*

Brinda las mismas ventajas que la detección de gestos y lo hace útil para aplicaciones de juegos.



Figura 16 Detección de cuerpos

Fuente: (Asus, 2016)

– *RGB*

La imagen del usuario es captada de forma real, permitiendo usarlo en sistemas de seguridad, detección de personas, etc.

– *Audio*

La detección de sonido es una función que, combinada con RGB, deja al usuario controlar aplicaciones con su voz y realizar video-conferencias.



Figura 17 Asus Xtion PRO LIVE

Fuente: (Asus, 2016)

Asus Xtion Pro Live tiene compatibilidad con Unity3D para desarrollar juegos, aplicaciones de seguridad, etc (Asus, 2016).

1.5.2. Especificaciones Asus Xtion Pro Live

En la tabla 6 mostrada a continuación se detallan cada una de las características de Asus Xtion Pro Live respecto a hardware, software, resolución, campo de visión, consumo de batería, etc, necesarios para su adecuado manejo.

TABLA 6

Especificaciones de Asus Xtion Pro Live

ESPECIFICACIONES ASUS XTION PRO LIVE	
Consumo de energía	Inferior a 2.5 W
Distancia de uso	Entre 0.8 m y 3.5 m
Campo de visión	58° H, 45° V, 70° D (Horizontal, Vertical, Diagonal)
Sensor	RGB y profundidad
Profundidad del tamaño de la imagen	VGA (640x480): 30 fps QVGA (320x240): 60 fps

CONTINÚA 

Resolución	SXGA (1280*1024)
Plataforma	Intel X86 & AMD
SO compatibles	Win 32/64 : XP , Win7 Linux Ubuntu 10.10: X86,32/64 bit Android (bajo petición)
Interfaz	USB2.0
Software	Kit de desarrollo de software (OPEN NI SDK bundled)
Lenguaje de programación	C++/C# (Windows) C++(Linux) Java
Ambiente de operación	Interiores
Dimensiones	18 x 3.5 x 5 cm

Fuente: (Allison, 2016)

1.5.3. Obtención de profundidad

La tecnología utilizada por Asus Xtion Pro Live no se centra solo en la posición del objeto, sino también en la detección y codificación de los haces de luz reflejada por los objetos.

Para obtener los datos de profundidad, el sensor emite un patrón infrarrojo conocido (Figura 18), misma que se deforma al momento de chocar con un objeto y es así que para calcular la distancia de cada punto mide la deformación de los puntos que componen esta malla (Figura 19).

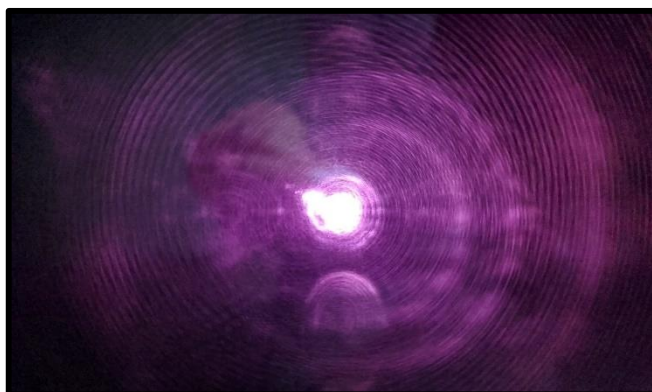


Figura 18 Patrón infrarrojo emitido

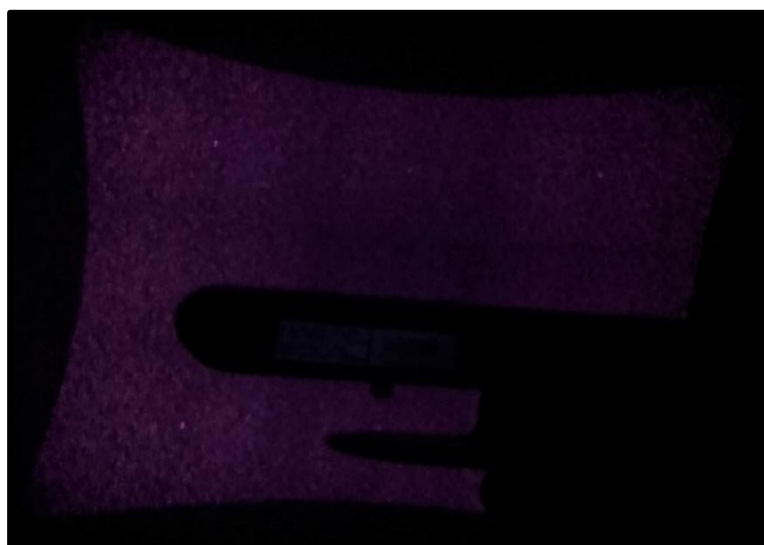


Figura 19 Malla de puntos infrarrojo

Mediante el chip de procesamiento de las imágenes (Intel X86 & AMDA2) se descompone la imagen y la codificación de la constelación infrarroja, eliminando el ruido producida por los rayos infrarrojos reflejados por la luz solar.

El cálculo de la distancia al objeto se realiza mediante triangulación de cada punto de la malla infrarroja de partida y su correspondiente punto en la malla recibida. Mediante el cálculo de todos los puntos del patrón se genera el mapa de profundidad.

El tamaño de los puntos de la constelación infrarroja nos proporciona información de la distancia al sensor. Se pueden distinguir varias zonas de funcionamiento, en las que la precisión del sensor variará según la zona.

1.5.4. Limitaciones

El sensor Asus Xtion Pro Live tiene limitaciones en cuanto a la lectura de la profundidad debido a factores como la construcción de la cámara y condiciones propias del medio a trabajar, debido a estos factores la profundidad puede tener lecturas erróneas en ciertas partes de una imagen y que resulta en datos no aceptables para su debido procesamiento.

Los rayos emitidos por el sensor en objetos a cortas distancias tienden a retornar valores muy similares, en el caso de objetos a largas distancias no retornan valores. Además, los valores retornados pueden ser nans que son resultados imposibles de calcular.

Los rayos infrarrojos emitidos por el sensor al encontrar un obstáculo proyectan una sombra del mismo a mayor distancia (Figura 20), este efecto da como resultado que no se pueda determinar la distancia en zonas que se encuentren dentro de la sombra, estas zonas se manifiestan como voxels de valor cero o zonas negras.

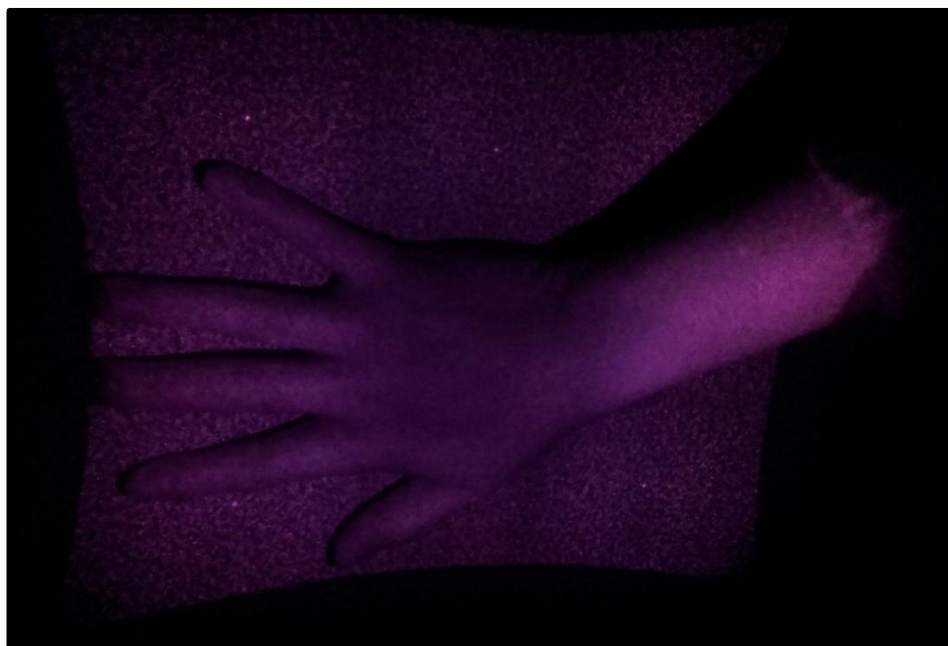


Figura 20 Proyección de sombra.

1.6. Linux

1.6.1. Descripción

GNU/Linux es un sistema operativo comparable con Windows, MacOS o DOS, es un conjunto de programas que enlazan al computador y la ejecución de programas y aplicaciones como editores de texto, juegos, navegadores de Internet, etc (Salomón, 2016).



Figura 21 Linux

Fuente: (COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA, 2016)

El desarrollo de Linux es uno de los principales en cuanto a software libre y su código puede ser usado, modificado por cualquier persona siempre bajo los términos de la GPL (Licencia Pública General de GNU) y otras licencias de software libre.

Este sistema operativo funciona tanto en entorno gráfico como en modo consola, el primero está enfocado al usuario final, mientras el segundo es utilizable principalmente en distribuciones para servidores.

Similarmente a Windows, el escritorio consta de ventanas, iconos y otras aplicaciones que facilitan la interacción con el usuario. En Linux existen varios escritorios como, por ejemplo (COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA, 2016):

- GNOME
- Xfce
- KDE
- Xf
- LXDE

1.6.2. El núcleo de Linux

Cada computador incluye un conjunto básico de programas llamados sistema operativo, el más importante de estos programas es aquel llamado Kernel.

El sistema operativo cumple dos objetivos importantes:

- Interactúa con los componentes de hardware.
- Provee un ambiente para la ejecución de aplicaciones que corren el computador.

El Kernel arranca desde la RAM y contiene muchos procesos críticos necesarios para que el sistema opere. Los otros programas tienen utilidades menos cruciales pero las capacidades esenciales del sistema están determinadas por el Kernel, provee facilidades para todo lo que opera en el sistema y determina muchas de las características de software.

El núcleo de LINUX también conocido como kernel es un conjunto de drivers necesarios para usar el ordenador y que son los encargados de controlar el hardware. La versión más actualizada de Kernel de Linux es 4.2.

1.6.3. Lenguajes de programación

Los principales lenguajes de Linux son: lenguaje C, combinado con lenguaje ensamblador usado en ciertas partes de código, Perl, Python y varios lenguajes shell scripting. Algunos drivers también pueden ser escritos en C++, Fortran, u otros lenguajes, pero esto no es aconsejable. El sistema de construcción de Linux oficialmente solo soporta GCC como núcleo y compilador de controlador

1.6.4. Características de Linux

Entre las principales características de Linux se pueden tener en consideración las siguientes:

- Multitarea
- Multiusuario
- Multiplataforma
- Multiprocesador

1.6.5. Distribuciones de GNU/Linux

La más destacada es Debian/GNU que es una iniciativa no comercial de la FSF. Su ventaja es que no tiene fines de lucro comerciales.

El principal objetivo es difundir, recopilar y promover el uso de software libre, en donde son los usuarios los que mantienen el desarrollo de subestructuras de funcionamiento.

Se cuenta con todo el software requerido en un computador personal, desde correo, fax, navegación de red, seguridad, ofimática, etc. Lo cual demuestra su competitividad dentro del mercado.

En la figura 22 se muestra el escritorio que presenta la distribución DEBIAN de Linux.



Figura 22 Escritorio de la Distribución DEBIAN

Fuente: (COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA, 2016)

CAPÍTULO II

DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE DEL DISPOSITIVO

2.1. Selección de módulos para la implementación del dispositivo.

Una de las principales etapas en el desarrollo del proyecto es la adecuada selección de los dispositivos a utilizar, para saber que se cuenta con las herramientas y características de hardware y software idóneas para alcanzar los objetivos.

En el mercado existen un sin número de posibilidades a escoger en cuanto a tarjetas embebidas para desarrollo de proyectos, sin embargo, entre las más desatacadas tenemos RaspBerry PI y BeagleBone Black, es así que las comparaciones para determinar la más adecuada se realizará entre las características de estos dos dispositivos.

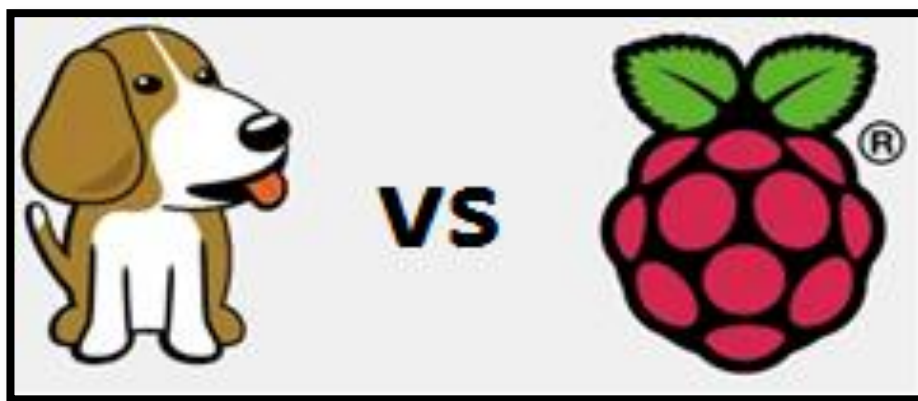


Figura 23 Iconos correspondientes a BBB y RaspBerry PI.

Fuente: (Alvarez, 2016)

2.1.1. Selección de la tarjeta

En esta sección se presenta las principales características de la tarjeta BeagleBone Black y RaspBerry PI.

TABLA 7

Diferencias de Hardware entre RaspBerry PI y BeagleBone Black

CARACTERÍSTICAS	BEAGLEBONE BLACK	RASBERRY PI
Procesador	1Ghz TI Sitara AM3359 ARM Cortex A8	900 Mhz Quad Core ARM
RAM	512 Mb DDR3L 400 Mhz.	1 Gb
Almacenamiento	4 GB en memoria flash expandible por USB & Micro SD	Requiere tarjeta Micro SD Expandible USB
Audio	Stereo over HDMI	Stereo over HDMI orf 3.5mm Jack
GPIO	65/92 Pins	26/40 Pins
HDMI	Micro HDMI	Puerto HDMI tamaño normal
Periféricos	1 puerto USB y puerto Ethernet 1 10/100	4 puertos USB y puerto Ethernet 1 10/100
Conexiones de video	1 Micro HDMI	1 HDMI
Resolución soportada	1280×1024 (5:4), 1024×768 (4:3), 1280×720 (16:9), 1440×900 (16:10) todos a 16 bit	Extensible desde 640×350 hasta 1920×1200, incluye 1080p
Sistemas operativos	Angstrom (predeterminado), Ubuntu, Android, ArchLinux, Gentoo, Minix, RISC OS, Otros	Raspbian (recomendado), Ubuntu, Android, ArchLinux, FreeBSD, Fedora, RISC OS, otros...
Power Draw	210-460 mA @ 5V under varying conditions	150-350 mA @ 5V under varying conditions
Fuentes de alimentación	Micro USB o conexión 5VDC	Micro USB

Fuente: (Woodfine, 2016)

En base a la información presentada en la tabla 7 se eligió la tarjeta BeagleBone Black principalmente por su ventaja tanto en procesador como

en capacidad de almacenamiento, resolución para el manejo de imágenes y que es uno de los principales requerimientos para el dispositivo de ayuda a personas no videntes por la cantidad de imágenes que se deben procesar y manejar.

Además de que se cuenta con una fuente de alimentación extra para asegurar el funcionamiento del dispositivo en recorridos largos y características de audio y memoria RAM de 512 Mb suficientes para el desarrollo del proyecto.

En cuanto a software, BeagleBone Black no requiere la instalación de software alguno ya que se puede manejar desde la plataforma virtual de manera rápida y en tiempo real solamente con la conexión Mini-USB y la instalación de drivers propios de BeagleBone Black, contra RaspBerry PI que es una tarea un poco más laboriosa ya que no incluye el cable USB y no posee un sistema operativo preinstalado, así que se debe adquirir una tarjeta SD para arrancar la tarjeta, descargar e instalar el sistema operativo y finalmente se la puede usar.

TABLA 8:

Pines de conexión BeagleBone Black y RaspBerry PI

BEAGLEBONE BLACK		RASPERRY PI
3 I2C buses	5 puertos seriales	8 pines GPIO
CAN bus	65 pines GPIO	1 interfaz UART
SPI bus	8 salidas PWM	1 SPI bus
4 temporizadores	7 entradas analógicas (1.8V máx. 12 bit convertidores A/D)	1 I2C bus

Fuente: (Woodfine, 2016)

Además de lo mencionado anteriormente, la tarjeta BeagleBone Black posee una mayor cantidad de pines de conexión, con prestaciones superiores a la tarjeta RaspBerry PI.

2.1.2. Selección de la cámara

La visión artificial se basa en la adquisición, procesamiento y manejo de imágenes y video en 3D, para este fin es necesario el uso de sensores de profundidad, también conocidos como sensores 3D, mismos que varían sus características de acuerdo al trabajo para el que están diseñados y la tecnología que utilizan, brindan información precisa de la distancia a los puntos en una escena teniendo en consideración que un punto sería el equivalente en 3D de un pixel en 2D.

Asus Xtion Pro Live y Kinect caen dentro de esta gama de sensores, su principio de funcionamiento se basa en la proyección de un patrón de luz infrarrojo sobre una superficie tridimensional que genera una línea de iluminación que se distorsiona de la perspectiva del proyector, y se usa para la reconstrucción de la superficie de la figura.

TABLA 9 Kinect VS Asus Xtion Pro Live

CARACTERÍSTICAS	Asus Xtion Pro Live	KINECT
Dimensiones	18 x 3.5 x 5 cm	33.3 X 27,4 X 7.9 cm
Sistemas operativos compatibles	Win. 32/64: XP, Win7 Linux Ubuntu 10.10: X86,32/64 bit Android (bajo petición)	Linux, OS X, Windows
Software	Kit de desarrollo de software (OPEN NI SDK bundled)	Open NI: BREKEL
Sensores	RGB y profundidad	RGB Y profundidad

CONTINÚA 

Campo de visión	58° H, 45° V, 70° D (Horizontal, Vertical, Diagonal)	57° H, 43 V, 27° D (Horizontal, Vertical, Diagonal)
Distancia de uso	Entre 0.8 m y 3.5 m	1,2 – 3,5 metros
Cámara	VGA (640x480): 30 fps QVGA (320x240): 60 fps	QVGA (320 × 240): 30fps (16 bit de profundidad) VGA (640 × 480): 30fps (32 bit de color)
Rayos infrarrojos	No	Si
Interfaz	USB 2.0	USB 2.0

Fuente: (Asus, 2016)

Tomando en consideración lo expuesto en la tabla 9. se puede notar que tanto la resolución de la cámara y los sensores en ambos dispositivos son similares e incluso la interfaz que utilizan, sin embargo una de las principales ventajas de Asus Xtion Pro Live en comparación con Kinect son sus dimensiones, ya que se tiene una diferencia de 15 x 24 x 2.9 lo que vuelve a Asus mucho más manipulable para un dispositivo portátil, los campos de visión también son mejores en Asus, principalmente en el campo de visión diagonal, además de un rango de detección de 1,7 m para Asus y 1,3 m para Kinect lo que remarca su ventaja.

2.2. Instalación del software

Después de adquirir la tarjeta, es necesario conectarla a un computador vía USB, e instalar los drivers correspondientes ya sea para Windows, Linux o Mac, dependiendo del sistema operativo que se maneje en el computador.

2.2.1. Instalación de drivers de la tarjeta BeagleBone Black en Windows.

BeagleBone Black es una tarjeta que tiene todas las funciones de una computadora convencional, para iniciarla es necesario instalar los drivers correspondientes para el sistema operativo para tener acceso mediante enlace USB a la BeagleBone Black.

Los drivers correspondientes se encuentran dentro de la carpeta boot: (D)/Drivers/Windows como se indica en las figuras 24 a 27:

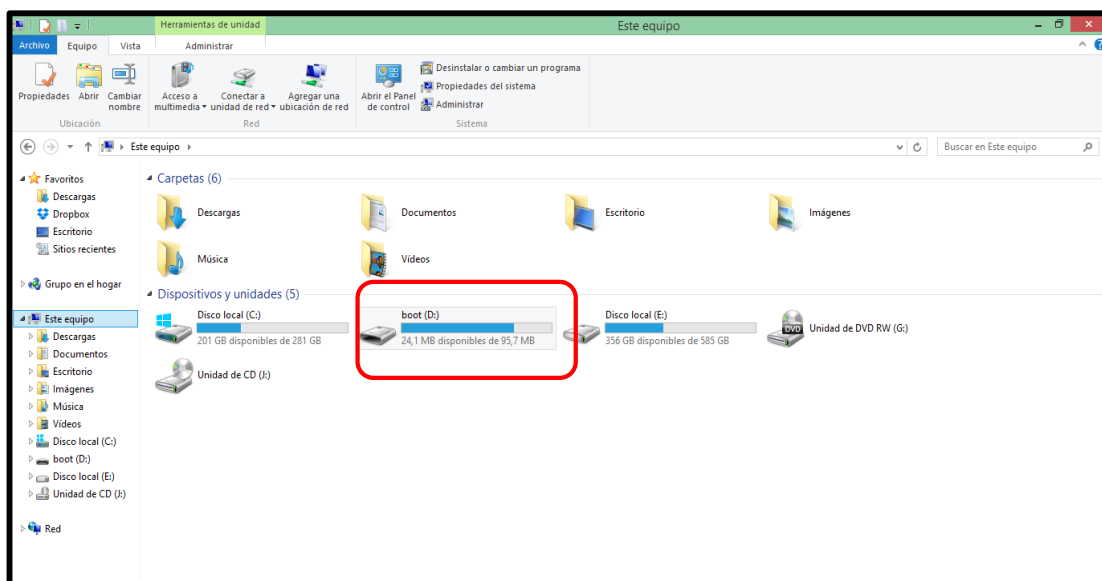


Figura 24 Dispositivo de la tarjeta BeagleBone Black en el explorador de Windows.

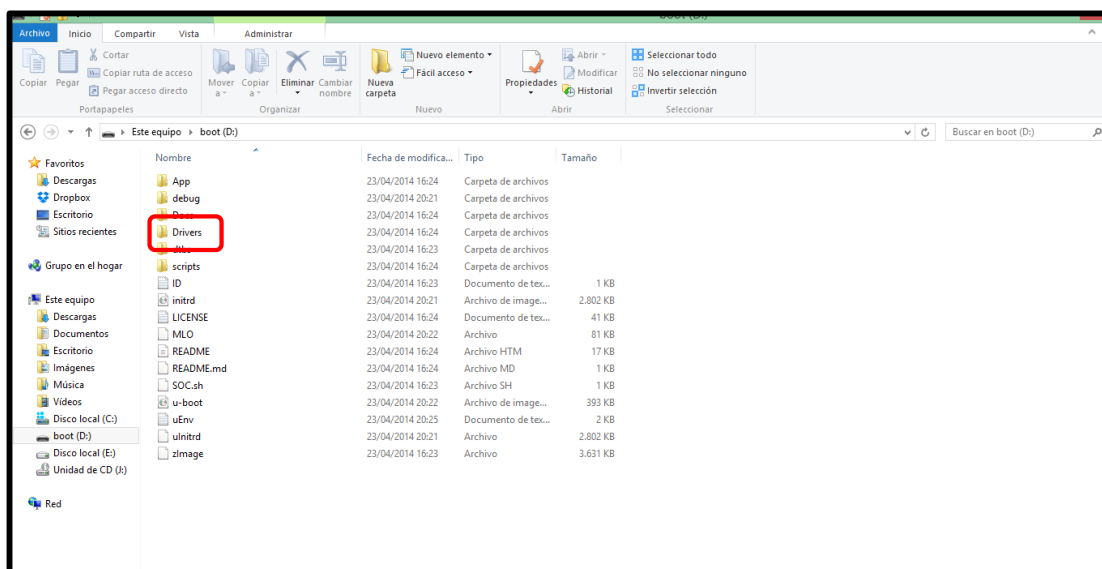


Figura 25 Carpeta contenedora de los drivers de la tarjeta BeagleBone Black

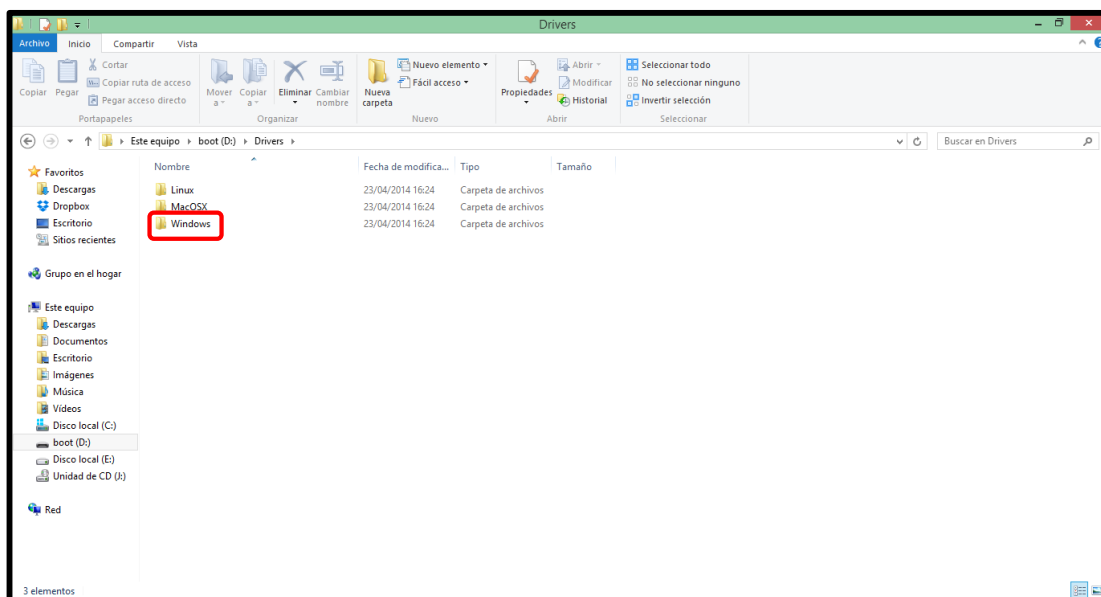


Figura 26 Carpeta contenedora de los drivers de la tarjeta BeagleBone Black para Windows.

Se debe seleccionar la carpeta indicada para iniciar la instalación de drivers para Windows 64 bits (figura 27):

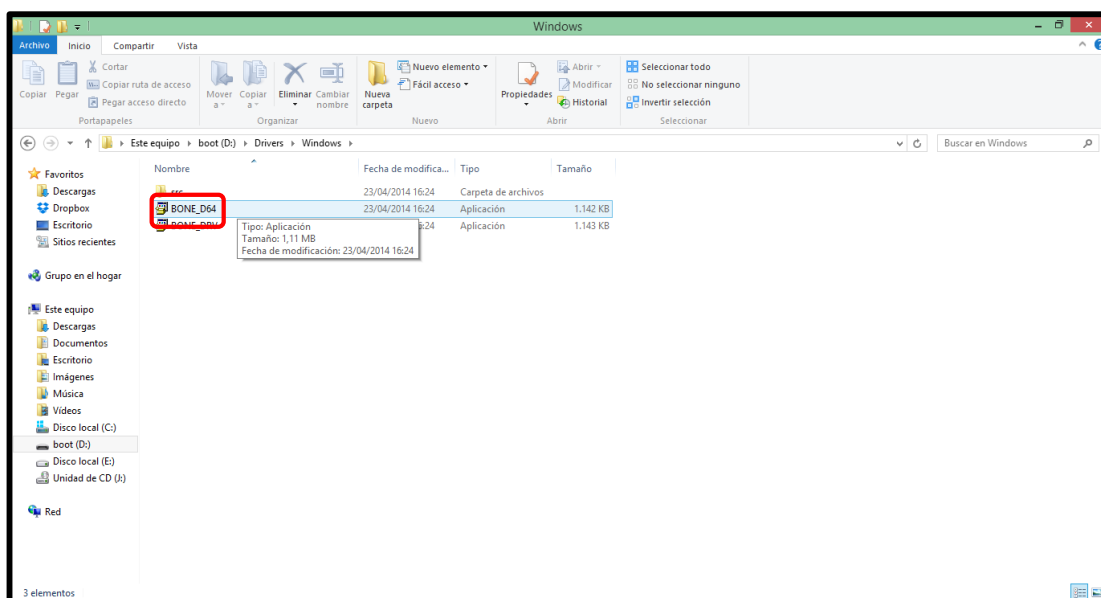


Figura 27 Drivers para Windows 64 bits.

Una vez iniciada la instalación se muestra la ventana que se presenta en la figura 28 “Asistente para la instalación de controladores de dispositivos”, y a partir de allí se deben seguir la secuencia de pasos hasta finalizar la instalación del software tal y como indica la Figura 29.



Figura 28 Asistente para la instalación de controladores de dispositivos.



Figura 29 Pantalla de Finalización de la instalación.

2.2.2. Instalación y actualización de Software en la tarjeta BeagleBone Black.

Para ejecutar el software inicial, la forma más sencilla es crear una réplica de la distribución de Linux que se desea, en una tarjeta microSD para arrancar la tarjeta BeagleBone Black desde ella.

Descargamos la imagen de distribución que vamos a utilizar (Figura 30), en este caso “Ubuntu” de la página <http://beagleboard.org/latest-images>. Este archivo tendrá extensión: .img.xz mismo q después de ser descomprimido, se carga en la tarjeta micro-sd.

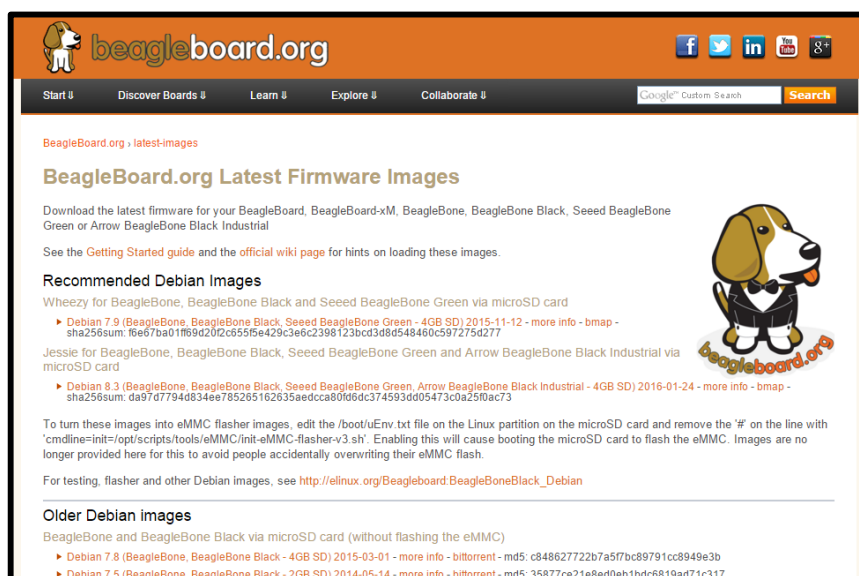


Figura 30 Ventana de archivos imágenes de la distribución “Ubuntu” para BeagleBone Black.

Conectamos la tarjeta microSD al ordenador, y con Image Writer escribimos la imagen comprimida a la tarjeta SD como se indica en la Figura 31 y abrir el archivo imagen de la distribución, teniendo en cuenta marcar la casilla indicada en color verde.

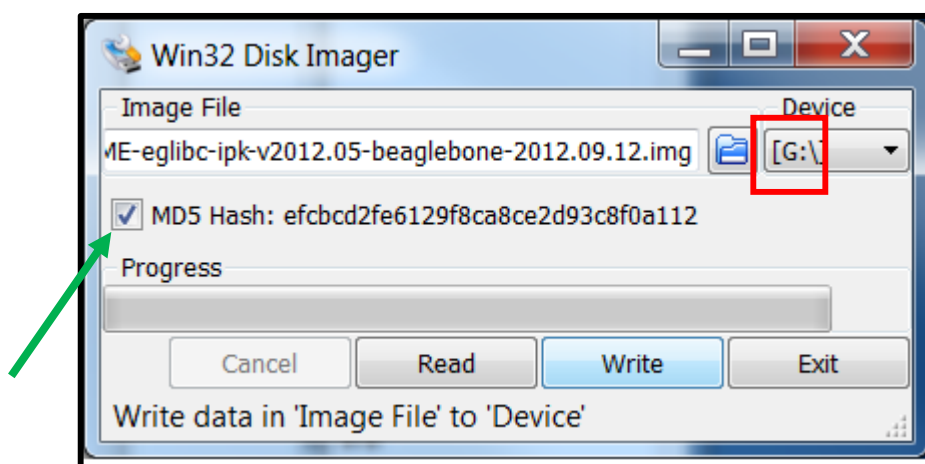


Figura 31 Ventana para el uso de Ubuntu Image Writer.

Una vez cargada la tarjeta SD con la distribución Debian, se la inserta en la ranura “microSD Card” de la tarjeta BeagleBone Black, y se la enciende manteniendo pulsado el botón USER / BOOT hasta que los cuatro leds de estado empiecen a parpadear, para este proceso es necesario alimentar la tarjeta mediante el cable USB o el adaptador de 5V.

2.2.3. Instalación de PCL

PCL se instala desde la terminal de Linux, solo son necesarios ciertos requerimientos tanto físicos como de software que se detallan a continuación (Grupo de Robótica, 2016):

A. *Requerimientos Físicos*

- Un dispositivo Asus Xtion Pro Live.
- BeagleBone Black corriendo Linux, Ubuntu o Debian.

B. *Requerimientos software*

PrimeSense drivers: software de libre distribución, necesarios para el procesamiento 3D, creados junto con NITE y SDK, todos estos, desarrollados para semejar un comportamiento humano usando sensores como Asus Xtion Pro Live, mediante PCL.

C. *Instalación de dependencias*

Mediante el comando:

```
sudo apt-get install build-essential cmake cmake-curses-gui libboost-all-dev
libeigen3-dev libflann-dev libvtk5-dev libvtk5-qt4-dev libglew-dev libxmu-dev
libsuitesparse-dev libqhull-dev libpcap-dev libxmu-dev libxi-dev libgtest-dev
libqt4-opengl-dev
```

Si se desea soporte VTK y Qt, se deben incluir los paquetes que se indican:

```
sudo apt-get install libvtk6-dev libqt5opengl5-dev
```

Serán removidos los paquetes VTK 5 y Qt 4, ya que PCL no funcionará si ambos se mezclan.

D. Java development Kit (JDK)

JDK es requerido por OpenNI, una vez descargado y descomprimido su contenido se copia en el siguiente contenedor: /usr/lib/jvm/, mediante los comandos que se indican:

```
sudo mkdir -p /usr/lib/jvm/
sudo cp -r jdk1.8.0_66/ /usr/lib/jvm/
```

Se compila y corre mediante:

```
sudo update-alternatives --install "/usr/bin/java" "java"
"/usr/lib/jvm/jdk1.8.0_66/bin/java" 1
```

```
sudo update-alternatives --install "/usr/bin/javac" "javac"
"/usr/lib/jvm/jdk1.8.0_66/bin/javac" 1
```

```
sudo update-alternatives --install "/usr/bin/jar" "jar"
"/usr/lib/jvm/jdk1.8.0_66/bin/jar" 1
```

JDK está instalado finalmente.

E. Instalación de OpenNI

PCL utiliza OpenNI y drivers PrimeSense para obtener datos de dispositivos como Asus Xtion Pro Live, mismas dependencias se instalaron con el comando siguiente:

```
sudo apt-get install python libusb-1.0-0-dev freeglut3-dev doxygen graphviz
```

Con las dependencias ya instaladas de forma correcta, y OpenNI descargado, dentro del subdirectorio Platform/Linux/CreateRedist/ se ejecutó:

```
./RedistMaker
```

Y dentro de *Platform/Linux/Redist/OpenNI-Bin-Dev-Linux-x64-v1.5.7.10/* finalmente se instala OpenNI con:

```
sudo ./install.sh
```

F. *Instalación de PrimeSense drivers*

En el directorio donde se extrajeron los PrimeSense drivers existen los siguientes subdirectorios: Platform/Linux/CreateRedist/, dentro se correrá el comando:

```
./RedistMaker
```

Y en Platform/Linux/Redist/Sensor-Bin-Linux-x64-v5.1.6.6/:

```
sudo ./install.sh
```

G. *Descarga e instalación de PCL*

Se crea una carpeta con el nombre “build” dentro del archivo pcl-pcl-1.7.2.tar.gz, una vez descomprimido y dentro de la nueva carpeta creada configuramos PCL con el comando:

```
cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release ..
```

Cmake puede hallar todas las dependencias, y construir cada subsistema necesario. Sin embargo, se puede modificar manualmente todas ellas ya sea activando o desactivando las dependencias a instalar con el comando: cmake. (Figura 32):

```

Page 1 of 2
BOOST_THREAD_LIBRARY /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libpthread.so
BUILD_2d ON
BUILD_CUDA ON
BUILD_GPU ON
BUILD_apps ON
BUILD_apps_3d_rec_framework ON
BUILD_apps_cloud_composer ON
BUILD_apps_in_hand_scanner ON
BUILD_apps_modeler ON
BUILD_apps_optronic_viewer ON
BUILD_apps_point_cloud_editor ON
BUILD_common ON
BUILD_examples OFF
BUILD_features ON
BUILD_filters ON
BUILD_geometry ON
BUILD_global_tests OFF
BUILD_io ON
BUILD_kdtree ON
BUILD_keypoints ON
BUILD_ml ON
BUILD_octree ON
BUILD_outofcore ON
BUILD_people ON
BUILD_recognition ON
BUILD_registration ON
BUILD_sample_consensus ON
BUILD_search ON
BUILD_segmentation ON
BUILD_simulation OFF
BUILD_stereo ON
BUILD_surface ON
BUILD_surface_on_nurbs ON
BUILD_tools ON
BUILD_tracking ON
BUILD_visualization ON
CMAKE_BUILD_TYPE Release
CMAKE_CONFIGURATION_TYPES Debug;Release
CMAKE_INSTALL_PREFIX /usr/local
CUDA_ARCH_BIN 2.0 2.1(2.0) 3.0
CUDA_ARCH_PTX
CUDA_BUILD_CUBIN OFF
CUDA_BUILD_EMULATION OFF
CUDA_HOST_COMPILER /usr/bin/cc
CUDA_SDK_ROOT_DIR /usr/local/cuda
CUDA_SEPARABLE_COMPILATION OFF
CUDA_TOOLKIT_ROOT_DIR /usr/local/cuda
CUDA_VERBOSE_BUILD OFF
DPKG_PROGRAM /usr/bin/dpkg
ENSENSE_ABI_DIR ENSENSE_ABI_DIR-NOTFOUND
FZAPI_INCLUDE_DIR FZAPI_INCLUDE_DIR-NOTFOUND
FZAPI_LIBS FZAPI_LIBS-NOTFOUND
FZ_API_DIR default value
LIBUSB_1_INCLUDE_DIR /usr/include
LIBUSB_1_LIBRARY /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libusb-1.0.so
PCAP_INCLUDE_DIR /usr/include
PCAP_LIBRARY /usr/lib/x86_64-linux-gnu/libpcap.so

BOOST_THREAD_LIBRARY: The threading library used by boost-thread
Press [enter] to edit option
Press [c] to configure      Press [g] to generate and exit
Press [h] for help          Press [q] to quit without generating
Press [t] to toggle advanced mode (Currently Off)

```

Figura 32 Dependencias para PCL

Una vez configurado todo, se debe construir el sistema con el comando:

Make

Finalmente se instala y se reinicia el equipo al finalizar:

sudo make install

2.3. Manejo de la tarjeta BeagleBone Black

2.3.1. Prueba de funcionamiento de la tarjeta BeagleBone Black.

En el buscador se accede a la IP 192.168.7.2, para ingresar a la página oficial de beagleboard.org y clic en “Cloud9 IDE” localizado en la parte izquierda de la ventana como se muestra en la figura 33:

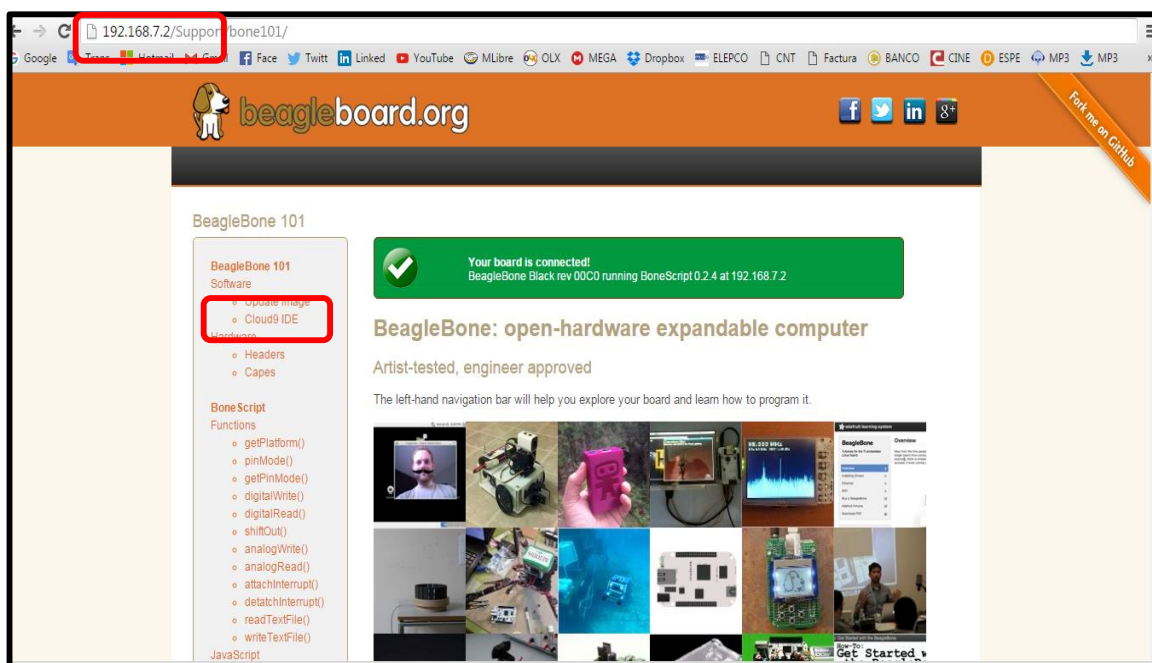


Figura 33 Ventana beagleboard.org

Se desplegará la pantalla que se muestra en la figura 34. Al ingresar al enlace mostrado se accede a la terminal de Cloud9 IDE, donde se puede realizar la programación de la tarjeta BeagleBone Black (figura 37).

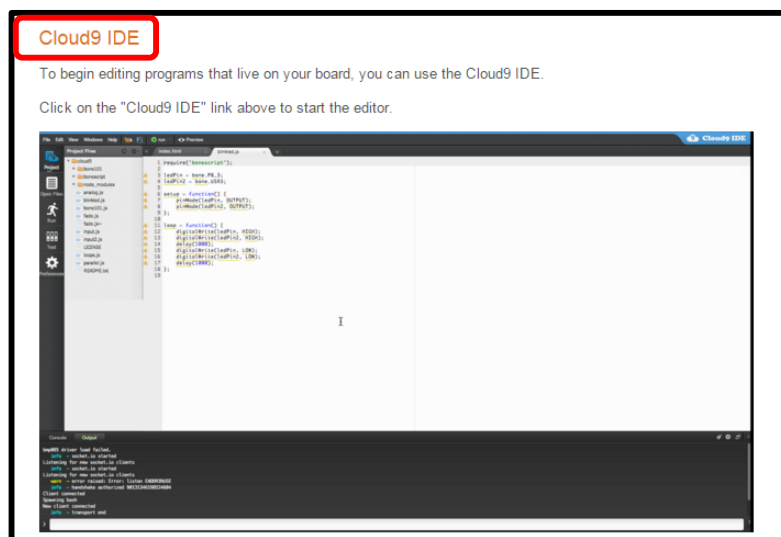


Figura 34 Pantalla donde se encuentra el Link Cloud9 IDE

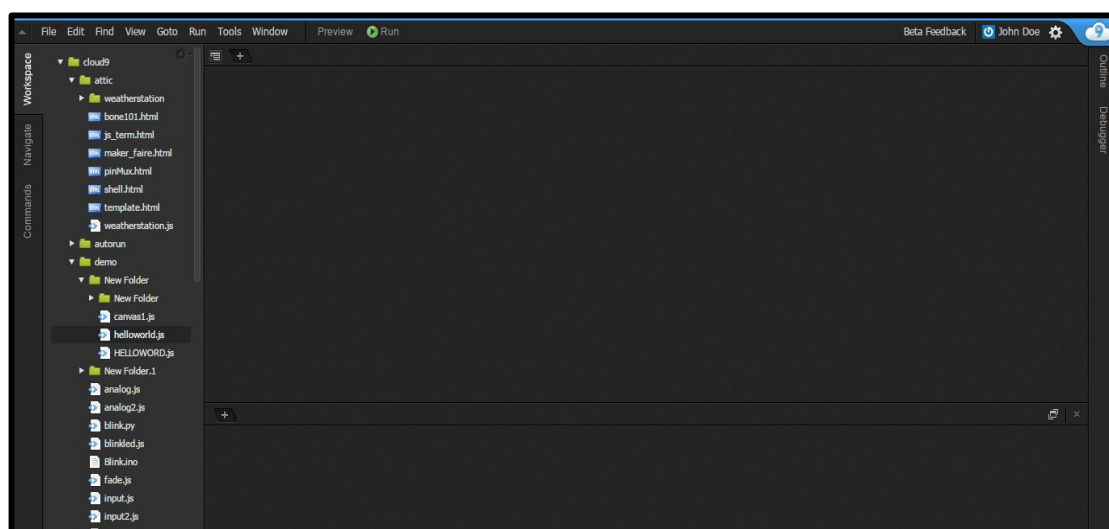


Figura 35 Interfaz de Cloud9 IDE

En la pestaña “File” / “New file” se tiene acceso a la generación de un nuevo archivo de programación, mientras que la selección del lenguaje de programación se realiza en la pestaña marcada en la figura 36. Entre las opciones se tiene: C, Python, Java, JavaScript, Perl, PHP, etc.

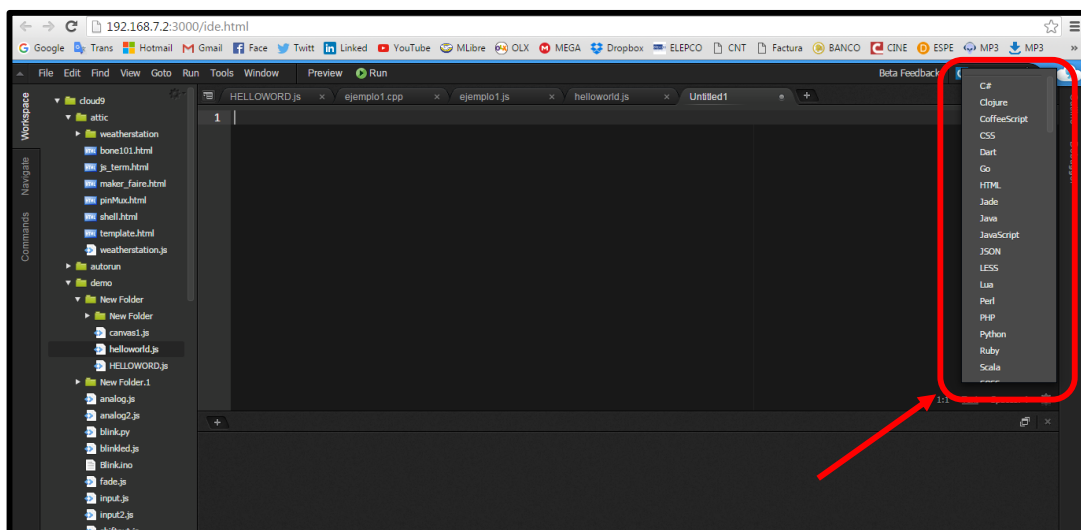


Figura 36 Selección de lenguaje de programación.

Una vez seleccionado el lenguaje, se procede a programar y guardar al nuevo archivo desde File/Save as, con el nombre deseado y para compilarlo se da clic derecho sobre la pestaña correspondiente y posteriormente en “Run this File” (figura 37):

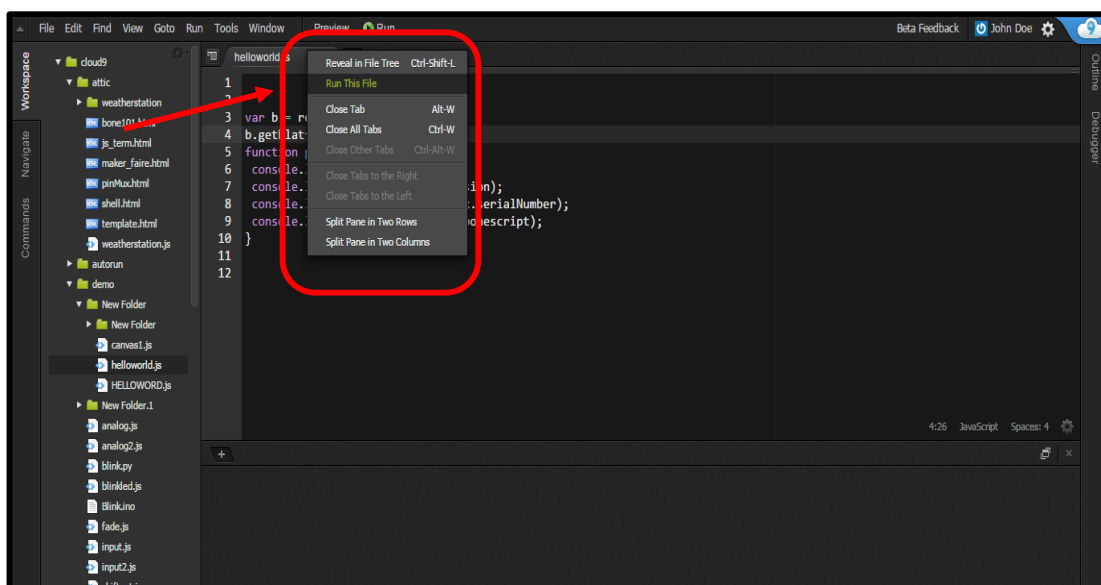


Figura 37 Opción “Run This File” para compilar.

Y finalmente ejecutamos el programa desde la pestaña mostrada en la figura 38.

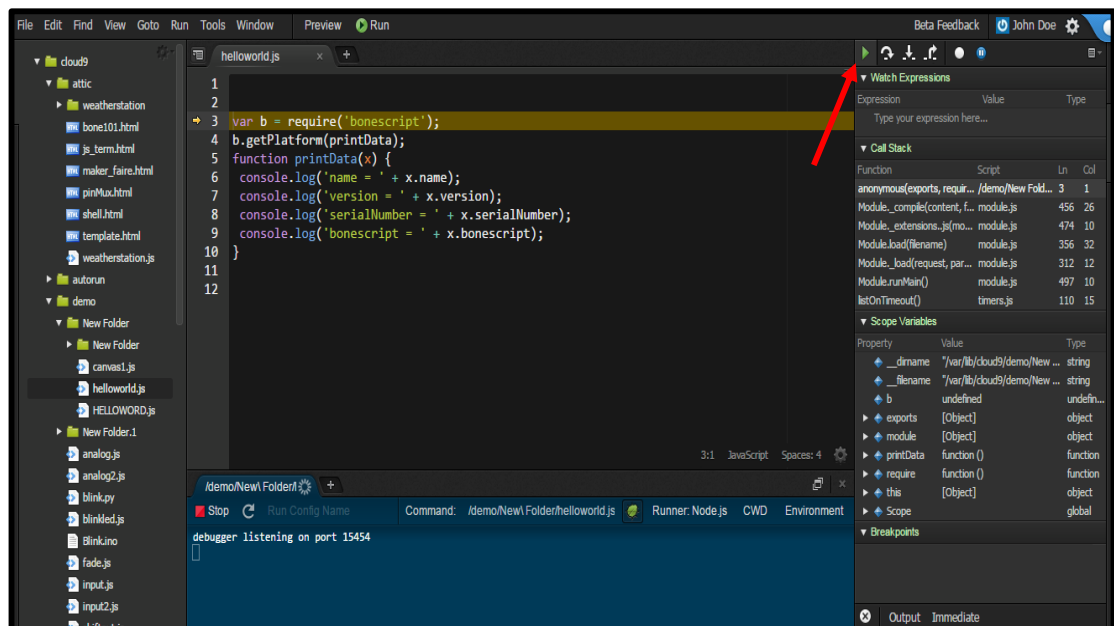


Figura 38 Icono que ejecuta el código

Los resultados de los programas ejecutados se mostrarán en la parte inferior color azul de la pantalla (figura 38):

2.3.2. PuTTY

Para acceder al sistema operativo de Linux desde el que se arranca la tarjeta BeagleBone Black, estando en Windows se emplea el programa PuTTY, cuyo nombre proviene de las siglas **Pu**: *port unique* **TTY**: *terminal type*, es decir, **puerto único de tipo terminal**. Es un cliente SSH, Telnet, Rlogin con licencia libre para Windows que permite (PuTTY, 2016):

- Almacenamiento de preferencias y host para uso posterior.
- Control sobre la versión del protocolo y la clave de cifrado.
- Re direccionamiento de puertos con SSH y reenvío X11.
- Emuladores de terminal xterm
- Soporta IPv6, autenticación de clave pública, conexiones de puerto local.

A. Configuración de PuTTY

Para el manejo de la tarjeta BeagleBone Black se configura PuTTY como un cliente SSH, de tal manera que podamos acceder a la terminal de Linux desde Windows con la finalidad de poder instalar el software necesario, crear archivos y realizar todas las actividades que permite el sistema operativo Linux.

El protocolo SSH que se usa para acceder a la terminal de Linux de la tarjeta, utiliza arquitectura cliente-servidor para facilitar la comunicación entre dos sistemas. Es semejante a FTP o Telnet con la diferencia de que SSH encripta la sesión de conexión. El acceso al ordenador se lleva a cabo a través de la red, se puede ejecutar comandos en la máquina host y mover ficheros entre ambas máquinas, al permitir conexiones seguras es un reemplazo admisible a *rlogin*, *rsh* y *rcp*.

Este tipo de protocolos permiten correr un cliente (BeagleBone Black) en la computadora que se está usando como servidor, lo cual genera una conexión de red entre ambas, llevando comandos desde el cliente hasta el servidor y la respuesta del servidor de regreso.

La figura 39 muestra PuTTY y las configuraciones necesarias para acceder a la tarjeta BeagleBone Black, empezando por el Host Name 192.168.7.2, la selección de SSH como tipo de conexión y el nombre con el cual se guarda la sesión al abrirse.

Cuando el cuadro de diálogo desaparece, se carga una nueva pantalla que es la interfaz de la terminal de Ubuntu, donde se debe ingresar el nombre de usuario y el password correspondiente, entonces ya se está trabajando en la sesión terminal normal dentro de la cual se tiene acceso a todos los archivos y directorios de la distribución cargada, además de privilegios para instalación y ejecución de programas. Se puede finalizar la sesión cuando se desee mediante el comando "logout".

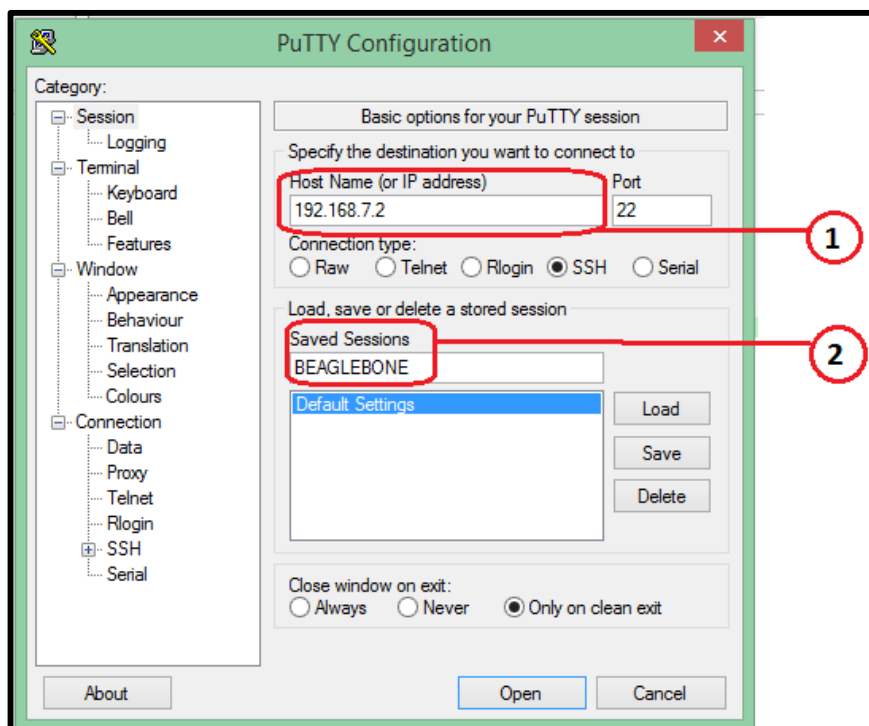


Figura 39 Ventana de configuración de PuTTY

Se puede acceder a la ayuda de PuTTY dando clic en las esquinas derecha o izquierda de la barra de título en caso de necesitarlo (ver figura 40).

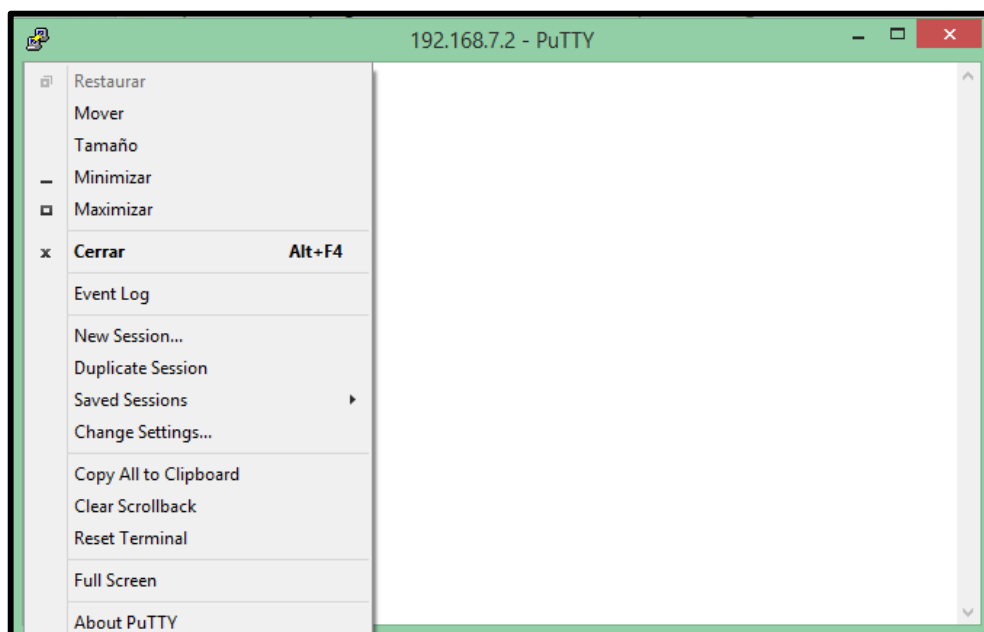


Figura 40 Ventana de programación y acceso a la ayuda de PuTTY

2.4. Enlace entre BeagleBone Black y Asus Xtion Pro Live

Una vez enlazada la tarjeta BeagleBone Black, se conecta el sensor Asus Xtion Pro Live a la tarjeta y se ingresa el comando siguiente *lsusb* en la terminal para mostrar los dispositivos conectados, en nuestro caso Asus Xtion Pro Live:

```
root@arm:~# lsusb
Bus 001 Device 003: ID 0d8c:013c C-Media Electronics, Inc. CM108 Audio Controlle
r
Bus 001 Device 004: ID 1d27:0601 ASUS
Bus 001 Device 002: ID 058f:9254 Alcor Micro Corp. Hub
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
```

Figura 41 Lista de dispositivos en BBB

2.5. Consideraciones de diseño

Para realizar el programa bajo el cual funcionará el dispositivo, se tendrán en cuenta varias consideraciones previas como el rango de visión y la altura promedio a la cual se encontrará el sensor Asus Xtion Pro Live para determinar las condiciones de trabajo del mismo, a continuación, en la figura 46 se indica el diagrama de flujo de las acciones a seguir para la programación.

La forma de presentación de las imágenes adquiridas está en función de ejes x, y, z, semejantes a los mostrados en la figura 42, donde se tiene en cuenta los tres ejes del sistema de coordenadas del sensor:

Eje X: Ancho del rango de visión (izquierda (-) a derecha (+)).

Eje Y: Altura del rango de visión (abajo (+) hacia arriba (-)).

Eje Z: Profundidad del campo de visión (origen (0) hacia atrás (+)).

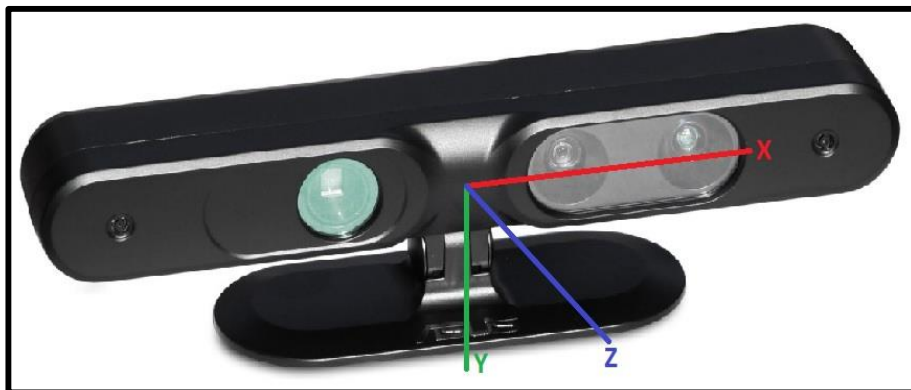


Figura 42 Sistemas de coordenadas del sensor

2.5.1. Consideraciones del campo de visión

Como base para el desarrollo del proyecto se deben considerar las condiciones iniciales de trabajo entre las cuales se debe tener en cuenta que la altura promedio de una persona (sujeto de prueba) la cual es de 1.7 m y que el sensor se hallará a una de altura de 0.6 m

Asus Xtion Pro Live tiene un rango de visión de 45 grados verticalmente y posibilidad de variar su ángulo de inclinación según la necesidad, la figura 43 muestra el campo de visión si se coloca el sensor en posición paralela al suelo, a una altura de 1.70 m dando una distancia de 4.32 m horizontalmente de manera ideal.

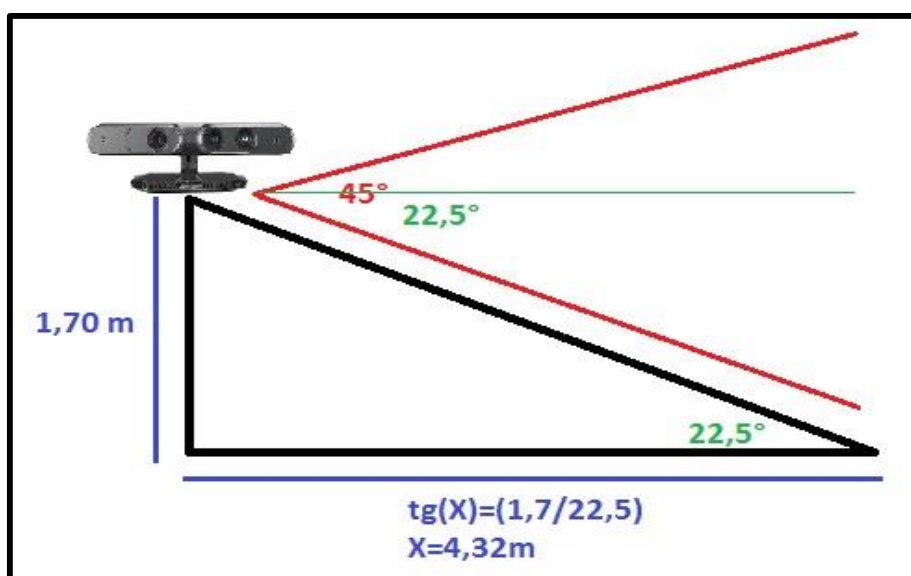


Figura 43 Campo de visión con ASUS a 1.7 m del suelo.

Las características de fábrica indican que la distancia de uso más adecuada del Asus Xtion Pro Live va de 0.8 a 3.5 m, además en rango de visión de interés es de 0.80 m a 1.60 m razón por la cual la altura de posicionamiento del sensor es de 0.60 m, obteniendo una situación semejante a la que se presenta en la figura 44, logrando una detección de posibles obstáculos a partir del rango indicado [0.80 m – 1.60 m] aproximadamente.

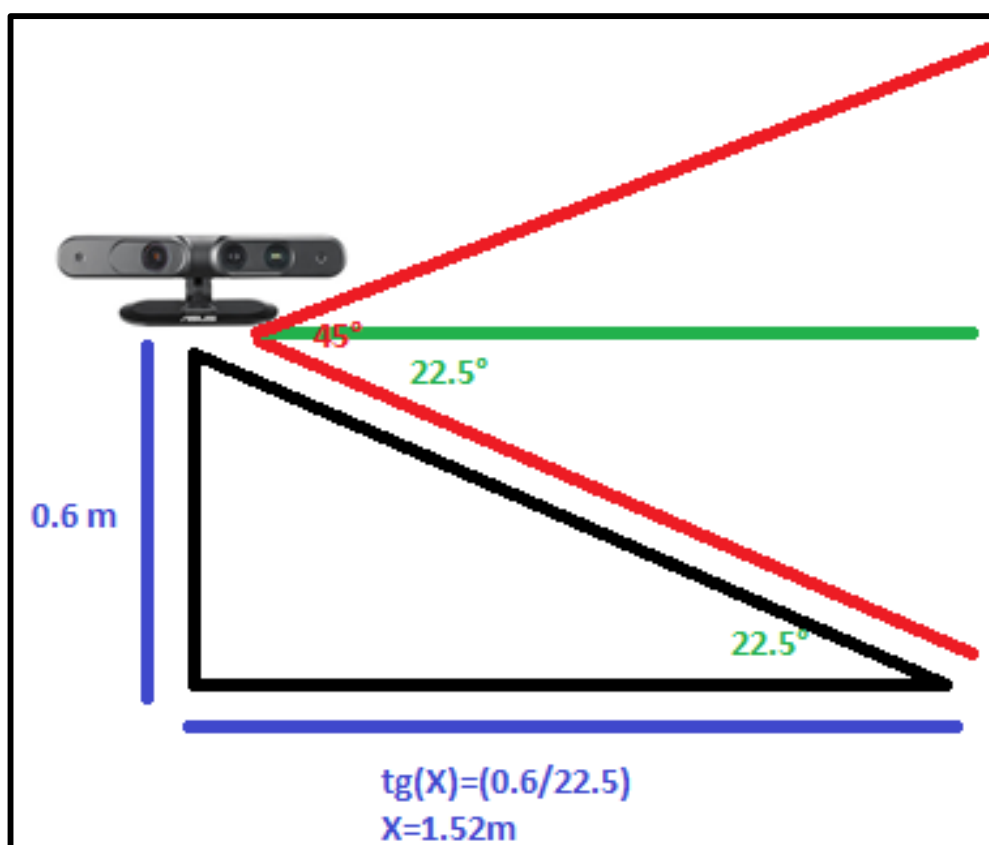


Figura 44 Campo de visión del sensor ASUS XTION PRO LIVE a una altura de 0.6 m

En la figura 44, la dimensión de la profundidad (eje z) es de 1.52 m momento a partir del cual alcanza visualización del suelo según los cálculos ideales, sin embargo, en base a las pruebas de captura de imágenes reales con el sensor ASUS XTION PRO LIVE la detección inicia a partir de 1.38 m a nivel del piso.

2.5.2. Diagrama de flujo de la programación

En la figura 45 se indica en base a un diagrama de flujo las diferentes etapas a seguir en la programación para la consecución del objetivo principal del proyecto.

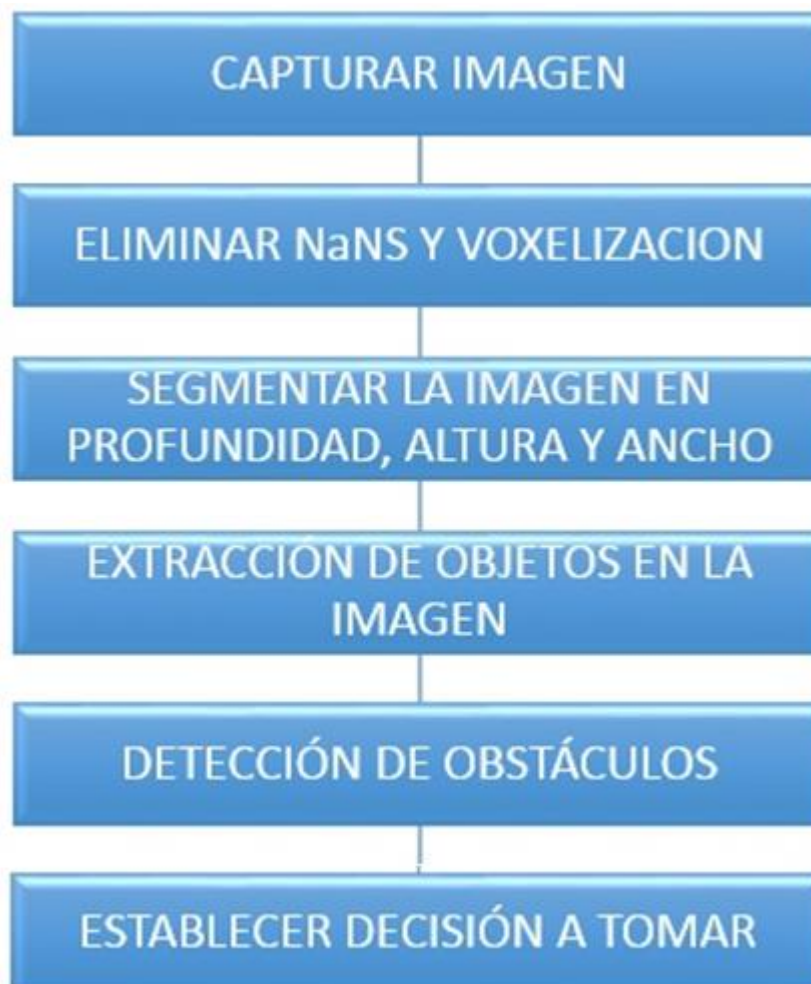


Figura 45 Diagrama de flujo

2.6. Etapas de programación

2.6.1. Captura de la imagen

La parte central para iniciar cualquier desarrollo es la captura de la imagen 3D a procesar (figura 46 y 47), ASUS entrega una nube de puntos en función

del rango de visión disponible que se guarda en un archivo con extensión .pcd. Dentro del programa se declaran paquetes como `openni_grabber.h`, que permite comunicarse con el sensor de captura y convertir los datos en el formato entendible por PCL; `pcd_io.h` para operaciones de almacenamiento de la nube en archivos y `pcl/visualization/cloud_viewer.h` para visualización junto con la librería VTK. El resto de las librerías se emplean para operaciones y declaración de variables.

El proceso de captura de imágenes se realiza de manera secuencial, capturando una imagen en un intervalo de 1 s con cada imagen 3D adquirida se realiza el procesamiento respectivo de filtrado y obtención de datos especificado en las siguientes secciones de este capítulo.



Figura 46 Imagen capturada con ASUS XTION PRO LIVE

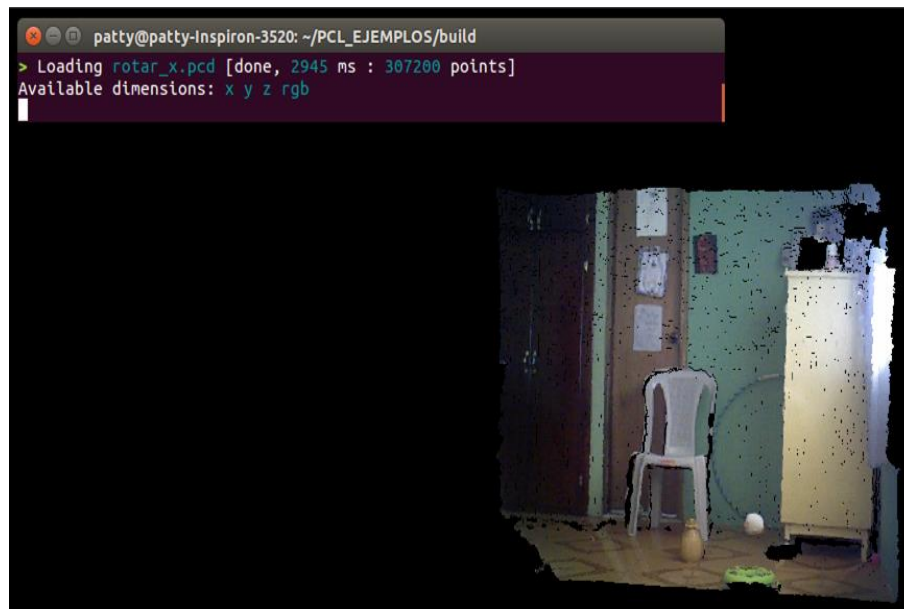


Figura 47 Imagen capturada por ASUS XTION PRO LIVE

2.6.2. Optimización de la imagen

La imagen 3D obtenida es una imagen en bruto que contiene un sin número de errores producidos por ruido, agujeros en la superficie, datos tomados fuera del rango de operación normal, etc., razón por la cual se debe optimizar la imagen eliminando NaNs (puntos en blanco) y realizando una segmentación de la imagen (voxelización) para determinar las distancias interpíxel e interslice y reflejar con exactitud las muestras con volumen del mundo real, reduciendo de este modo la presencia de errores y el tiempo de procesamiento de las mismas.

A. Eliminar Nans

Los Nans son datos incoherentes que necesariamente deben ser eliminados para un óptimo procesamiento de la imagen ya que estos datos pueden dar un valor que afecte a dicho procesamiento. Como se observa en la figura 48, la nube de puntos proporcionada por el sensor es de 307200 puntos incluidos los Nans que pueden dar una lectura errónea al momento de aplicar el algoritmo.

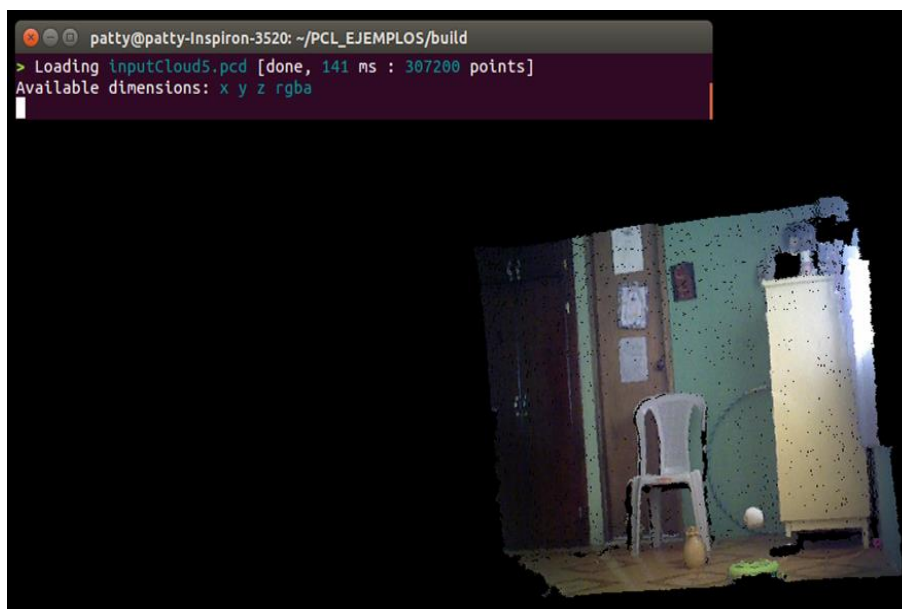


Figura 48 Imagen con Nans

Mediante la aplicación de la clase “removeNaN” de PCL se logra remover todos aquellos puntos cuyo valor de X,Y, ó Z sea incoherente, es decir, identificado como un NaN. A continuación se indica la clase utilizada:

```
void pcl::removeNaNFromPointCloud
```

```
(const pcl::PointCloud< PointT > cloud_in, std::vector< int > & index)
```

Una vez removidos los NaNs, se guarda el nuevo conjunto de puntos dentro de un nuevo PointCloud para su posterior utilización, la figura 49 muestra la imagen que se obtiene después de aplicar la remoción de NaNs a la imagen mostrada en la figura 48, y se visualiza el nuevo número de puntos que constituyen esta imagen, pudiendo observar que se ha reducido la cantidad de puntos de 307200 a 264734.

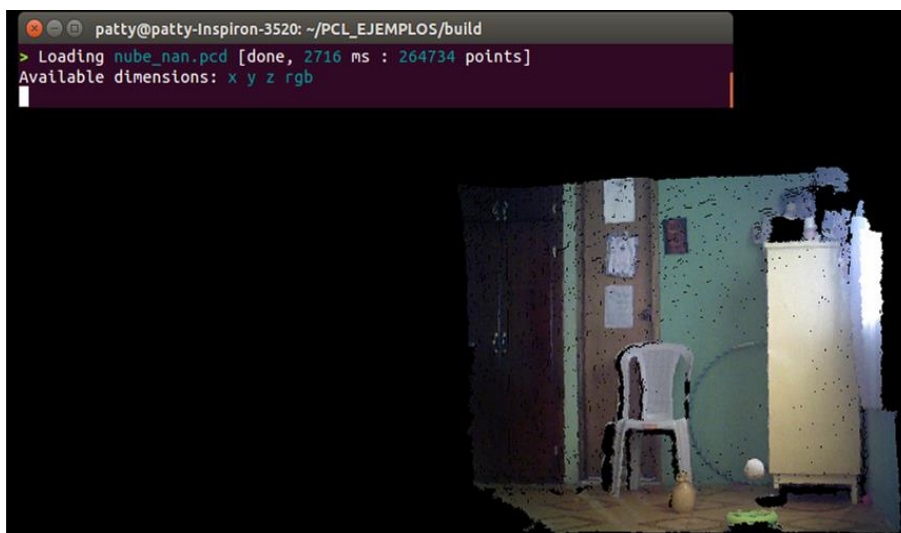


Figura 49 Imagen sin Nans

B. Downsampling

En esta etapa se pasa por el proceso de voxelización, se toma en consideración a conjuntos volumétricos para conseguir profundidad en una imagen, como se puede ver en la figura 50 se disminuye el número de puntos de 264734 (figura 49) a 94007 (figura 50), la nueva imagen posee las mismas características visuales que la original, pero con una resolución menor lo cual dará mayor velocidad a su procesamiento al aplicar el algoritmo.

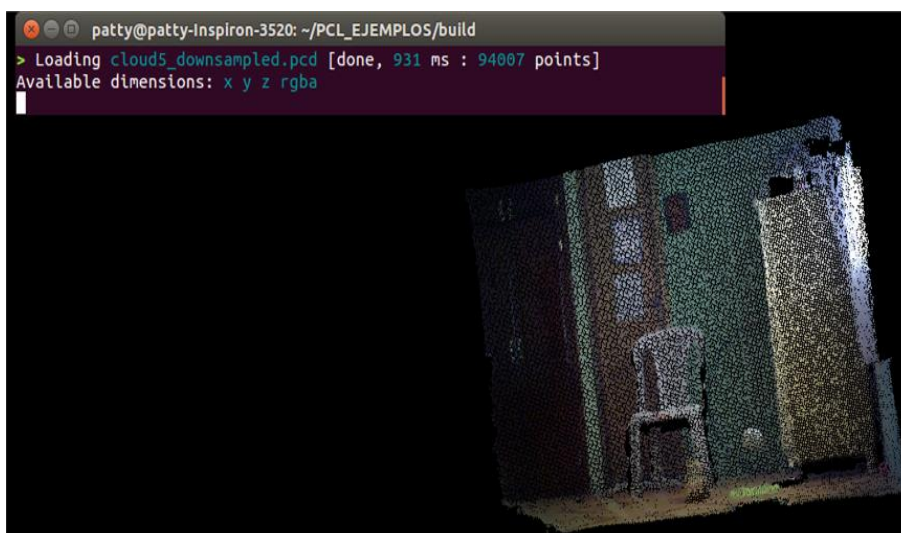


Figura 50 Efecto downsampling

2.6.3. Segmentación de la imagen

Antes de realizar el algoritmo de procesamiento, se debe segmentar la imagen en los tres ejes cartesianos x, y, z; para reducir el área de la nube de puntos únicamente a nuestra área de interés.

A. Segmentación en profundidad

Anteriormente se indicó que las características de funcionamiento del sensor establecen como rangos de trabajo límite una distancia de 3.5 m lo que implica que los datos tomados fuera de este intervalo pueden contener mayor número de errores y datos falsos, sin embargo, nuestra área de interés para el desplazamiento es de [0.8 – 1.6 m] razón por la cual es necesario segmentar la imagen en el eje "Z" dentro de este rango, para asegurar que los datos tomados sean confiables.

Para la segmentación en profundidad se empleará el filtro *passthrough*, cuya función es eliminar todas las nubes de puntos que se encuentren fuera del rango establecido en la programación. En la figura 51 se muestra la imagen original capturada por el sensor, mientras que en la imagen 52 se observa la misma imagen ya filtrada en un rango de [0.8 m a 1.6 m] en el eje "Z".

Los comandos utilizados para la segmentación en profundidad son los siguientes:

```
pcl::PassThrough<pcl::PointXYZ> filter;  
filter.setFilterFieldName("z");  
filter.setFilterLimits(0.8, 1.60);
```



Figura 51 Imagen original

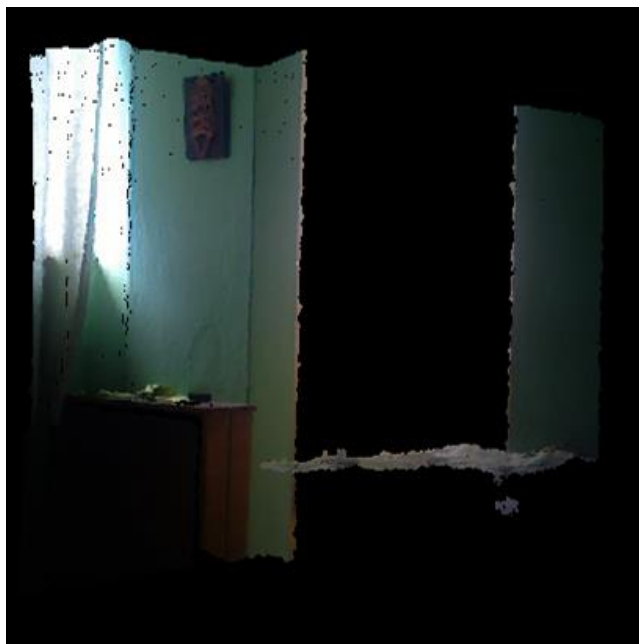


Figura 52 Imagen segmentada en profundidad a 1.60 m

B. Segmentación en altura

De forma semejante a la segmentación en profundidad, la segmentación en altura se realiza bajo los mismos comandos, simplemente cambiando el eje y

los límites del rango de filtrado. Bajo la consideración anterior de 1.70 m como estatura promedio, más 15 cm por la presencia de errores, se considera una altura de 1.85 m aproximadamente y se filtran todos los puntos que se hallen fuera de este límite.



Figura 53 Imagen original

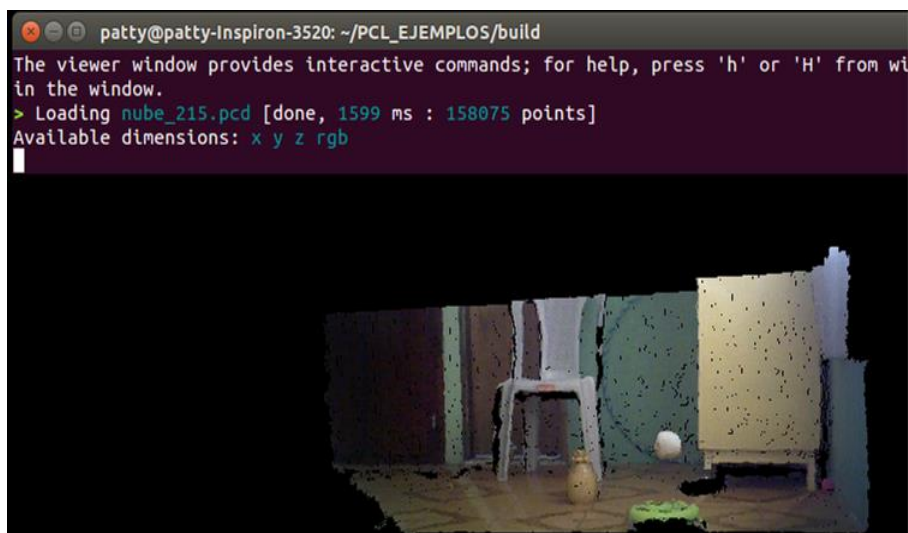


Figura 54 Imagen segmentada en altura [-0.2. a 0.9 m]

Los resultados obtenidos al aplicar el filtro en un rango de [-0.2 a 0.9 m] en el eje Y a la imagen mostrada en la figura 53, se pueden visualizar en la figura 54, en la cual se puede observar que todos los puntos fuera de este rango han

sido eliminados y la imagen se muestra recortada bajo los parámetros siguientes:

```
filter.setFilterFieldName("y");
```

```
filter.setFilterLimits(-0.2,0.9);
```

C. Segmentación en el eje X

La segmentación en el eje X se realiza de forma semejante a la segmentación en profundidad y altura. Para ejemplificar los resultados se realiza el filtraje en un rango de -0.80 m a 0.80 m a la imagen mostrada en la figura 53 y la salida obtenida se puede ver en la figura 55.

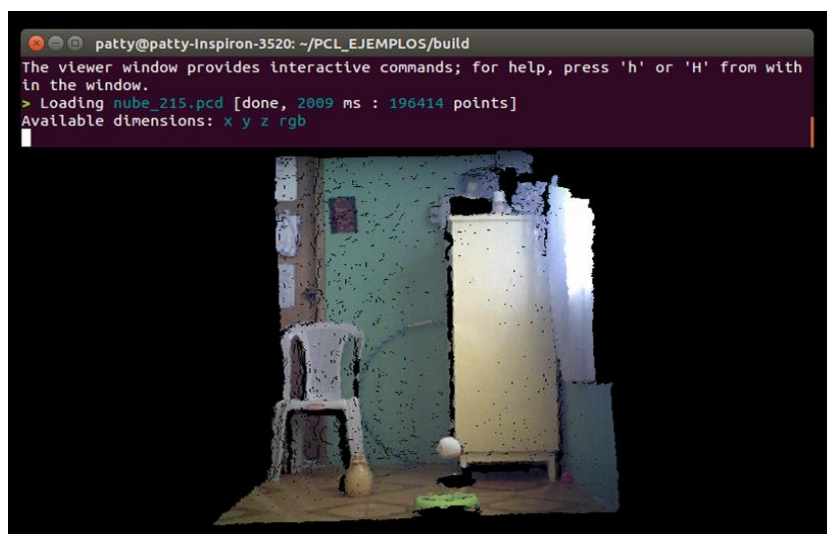


Figura 55 Imagen segmentada en el eje X [-0.8 a 0.8 m]

2.6.4. Extracción de obstáculos identificados

Inicia la etapa de Extracción de obstáculos identificados dentro de cada imagen 3D adquirida y procesada, para lo cual se emplean algoritmos propios de PCL, en nuestro caso la librería `pcl_sample_consensus`, y algoritmos `pcl::SAC_RANSAC` (RANDOM SAMPLE CONSENSUS), conocidos como algoritmos de segmentación y clases como "`pcl::ExtractIndices`".

El modelo usado para la determinación de planos es `SACMODEL_PLANE`, basada en los cuatro coeficientes de un plano [`normal_x normal_y normal_z`

d], misma que es muy conveniente para la estimación de planos y es obtenida a partir de la ecuación general de un plano (Ecuación 1):

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

Mediante la definición de los componentes del vector unitario normal

Y la constante p :

$$p = \frac{d}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \quad (2)$$

A continuación, la forma normal del plano es:

$$\hat{n} \cdot x = -p \quad (3)$$

Donde p es la distancia del plano desde el origen (Gellert et al. 1989, pp. 540-541).

En las siguientes líneas de código se crea el objeto que se usará para la segmentación y se establece el modelo y el tipo de método, además del umbral de distancia que establece la distancia a la que un punto se debe encontrar para que sea considerado como parte del modelo.

A. Creación del objeto de segmentación en Point Cloud Library:

La clase SACSegmentation de Point Cloud Library permite mediante sus funciones establecer el método de segmentación, el modelo de segmentación, el número máximo de iteraciones que realizará el algoritmo, y la distancia límite a la cual se considerará un punto como parte de la estimación.

```
pcl::SACSegmentation<pcl::PointXYZ> seg;
seg.setModelType (pcl::SACMODEL_PLANE);
seg.setMethodType (pcl::SAC_RANSAC);
seg.setMaxIterations (500);
seg.setDistanceThreshold (0.05);
```

Mediante la siguiente clase se extraen los índices deseados:


```
pcl::ExtractIndices<pcl::PointXYZ> extract;
```

B. Obtención de obstáculos sobre el suelo

Bajo los algoritmos expuestos anteriormente aplicados a una imagen 3D (figura 55) se obtienen los objetos existentes en la misma tal como se muestra en la figura 56 sin la presencia del piso.



Figura 56 Imagen aplicado SACSegmentation

Para el algoritmo del proyecto, se tienen en cuenta los siguientes parámetros para la determinación de secciones en las que se divide la imagen para la detección de obstáculos.

- Obstáculos localizados en el piso al lado izquierdo (PI)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.83 m a -0.50 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso en la parte central izquierda (PCI)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.50 m a -0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso en la parte central (PC)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.25 m a 0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso en la parte central 1 (PC1)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.25 a 0 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso en la parte central 2 (PC2)

Límites de filtro PassThrough en x: 0 m a 0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso en la parte central derecha (PCD)

Límites de filtro PassThrough en x: 0.25 m a 0.50 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Obstáculos localizados en el piso a la derecha (PD)

Límites de filtro PassThrough en x: 0.5 m a 0.83 m

Límites de filtro PassThrough en y: -0.3 m a 0.60 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

C. Obtención de rótulos elevados

De forma idéntica a los dos apartados anteriores para la detección de rótulos, es decir, objetos elevados:

- Rótulos elevados al lado izquierdo (RI)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.83 m a -0.50 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados en la parte central izquierda (RCI)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.5 m a -0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.8 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados en la parte central (RC)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.25 m a 0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados en la parte central 1 (RC1)

Límites de filtro PassThrough en x: -0.25 a 0 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados en la parte central 2 (RC2)

Límites de filtro PassThrough en x: 0 m a 0.25 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.6 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados en la parte central derecha (RCD)

Límites de filtro PassThrough en x: 0.25 m a 0.50 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

- Rótulos elevados a la derecha (RD)

Límites de filtro PassThrough en x: 0.50 m a 0.83 m

Límites de filtro PassThrough en y: -2.0 m a -0.30 m

Límites de filtro PassThrough en z: 0.80 m a 1.60 m

Tipo de modelo: SACMODEL_PLANE

Tipo de método: SAC_RANSAC

Número máximo de iteraciones: 500

Distancia límite: 0.05 equivalente a 5 cm

Los valores indicados permiten tener un seccionamiento semejante al mostrado en la figura 57 para cada una de las imágenes analizadas, bajo las siguientes consideraciones:

- Rótulos elevados al lado izquierdo (RI)
- Rótulos elevados en la parte central izquierda (RCI)
- Rótulos elevados en la parte central (RC)
- Rótulos elevados en la parte central 1 (RC1)
- Rótulos elevados en la parte central 2 (RC2)
- Rótulos elevados en la parte central derecha (RCD)
- Rótulos elevados a la derecha (RD)
- Obstáculos localizados en el piso al lado izquierdo (PI)
- Obstáculos localizados en el piso en la parte central izquierda (PCI)
- Obstáculos localizados en el piso en la parte central (PC)
- Obstáculos localizados en el piso en la parte central 1 (PC1)
- Obstáculos localizados en el piso en la parte central 2 (PC2)
- Obstáculos localizados en el piso en la parte central derecha (PCD)
- Obstáculos localizados en el piso a la derecha (PD)

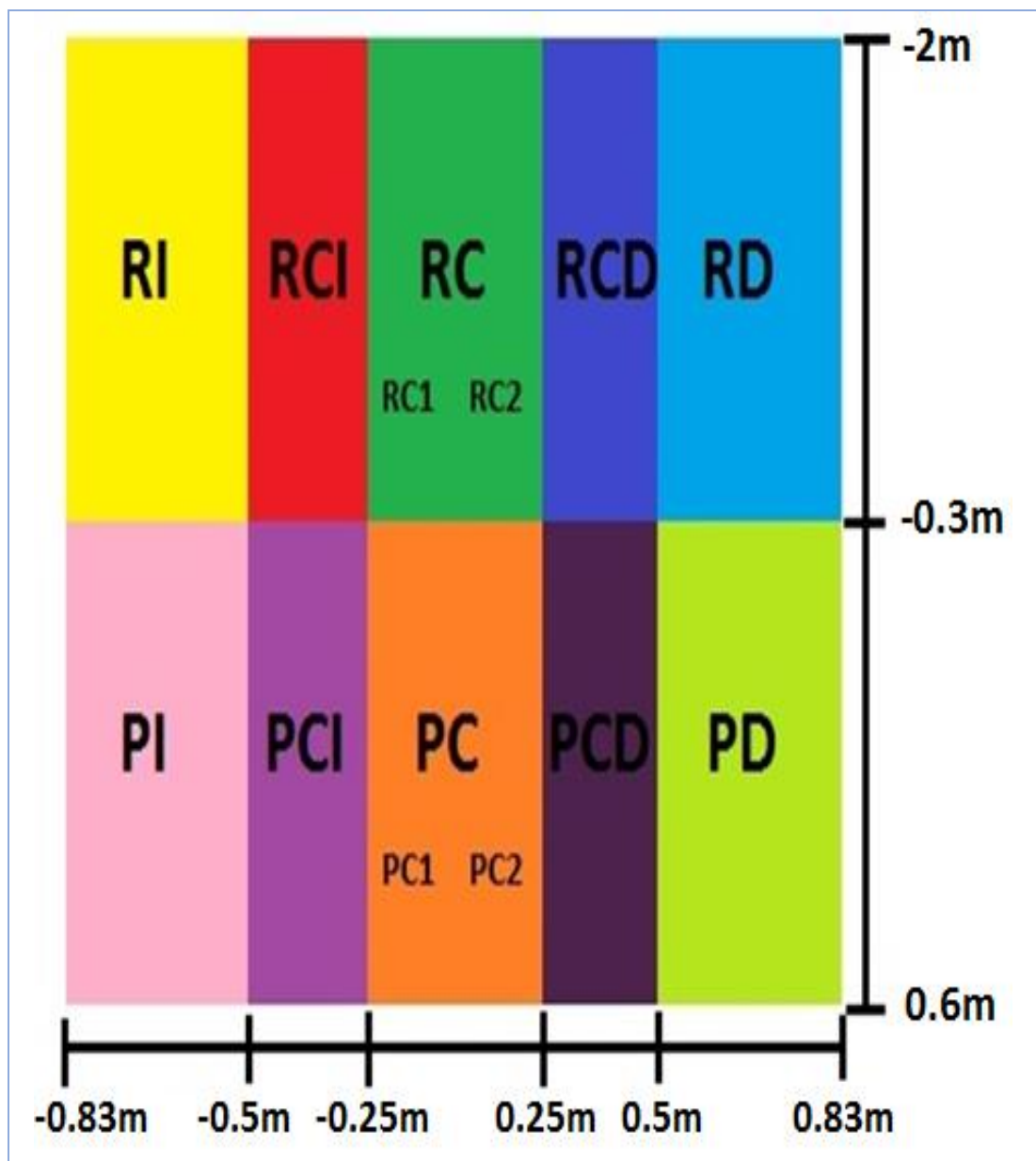
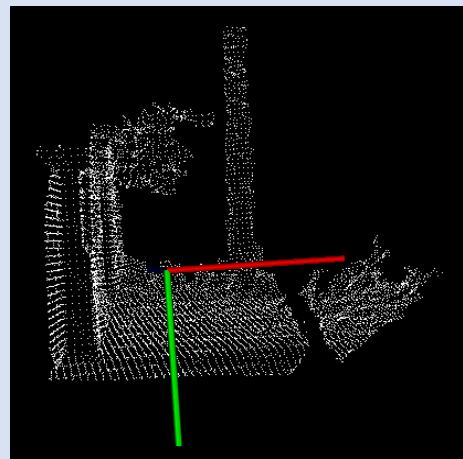


IMAGEN 3D FRONTAL



IMAGEN 3D FRONTAL FILTRADA



CONTINÚA →

IMAGEN 3D LATERAL

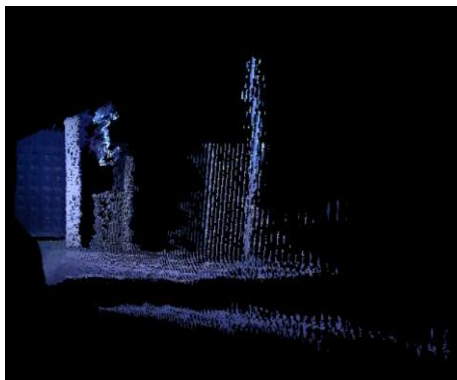
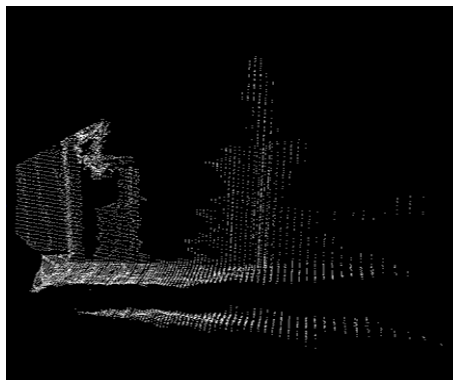
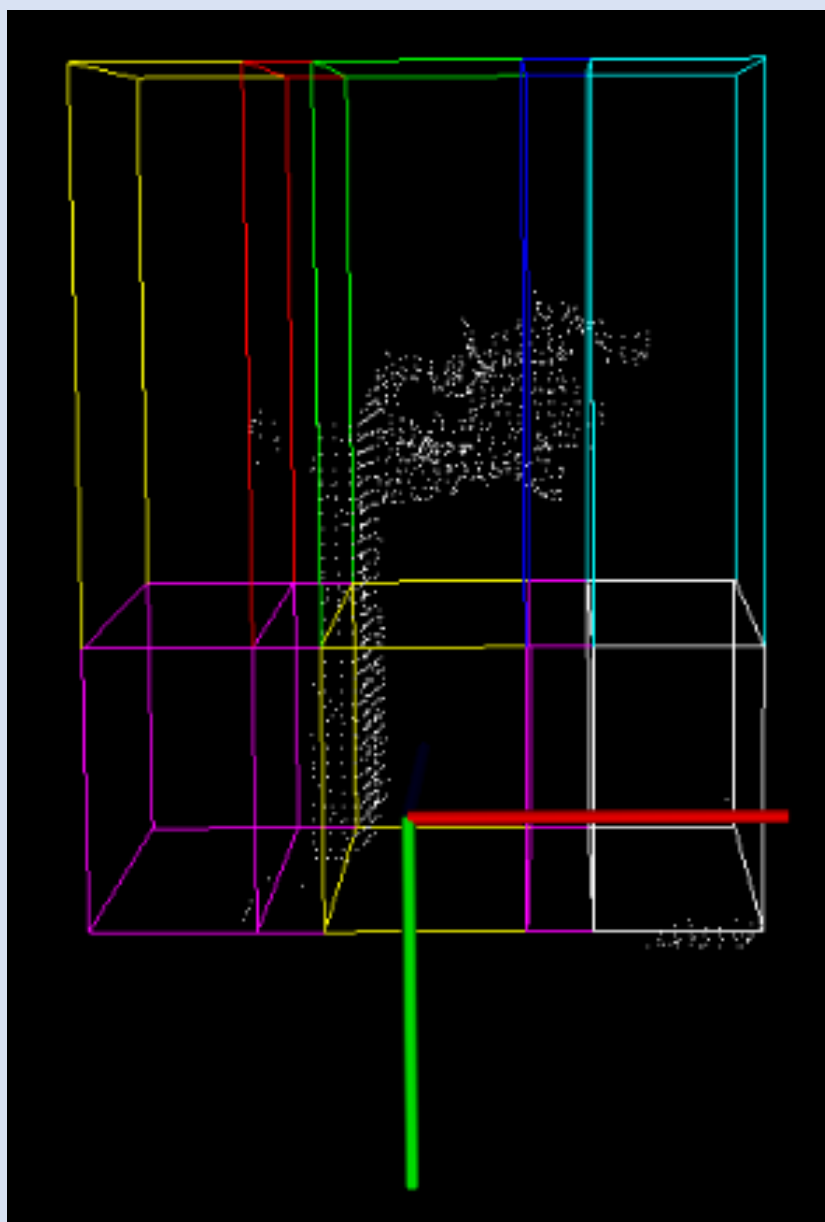
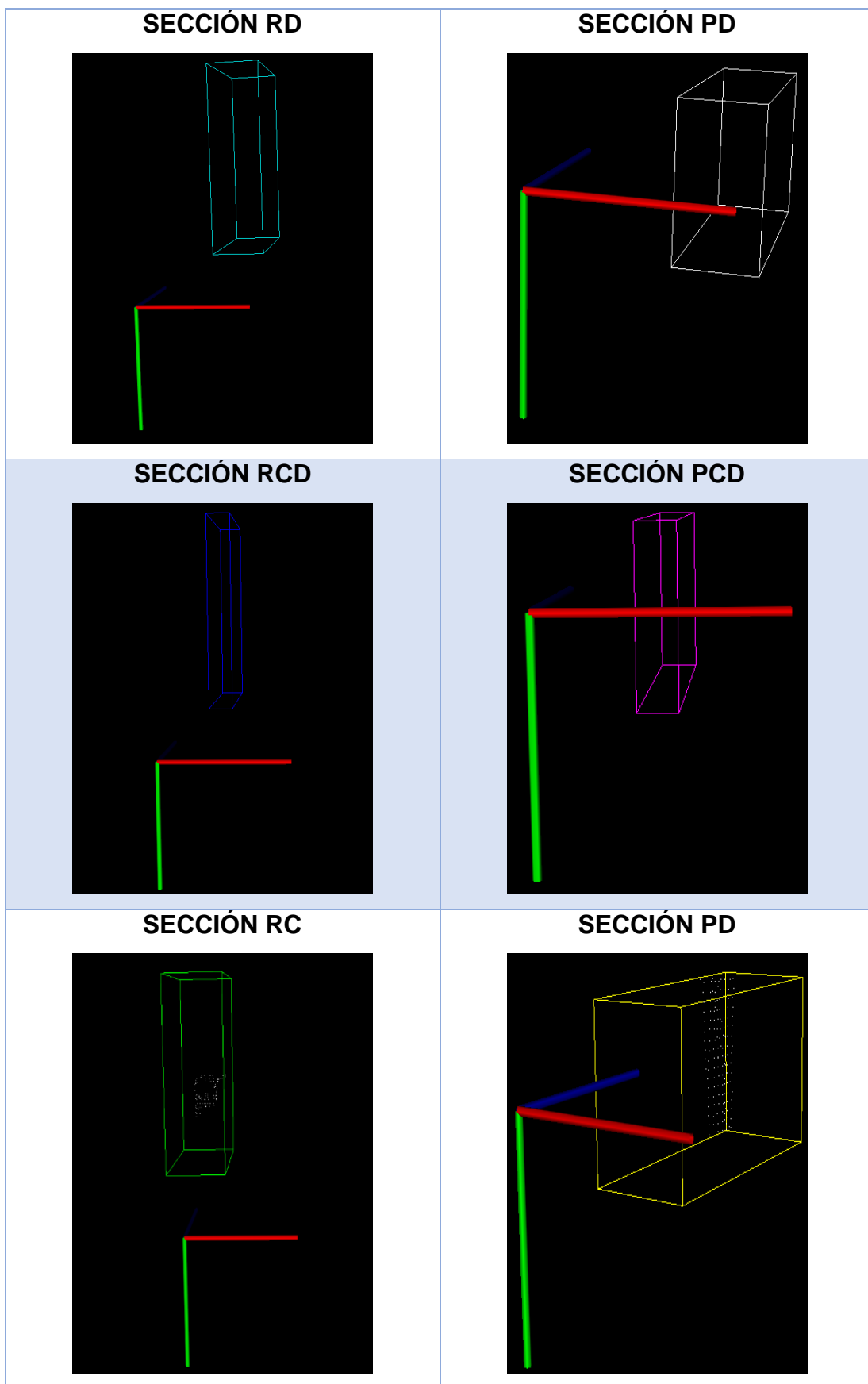


IMAGEN 3D LATERAL FILTRADA



OBJETOS EXTRAÍDOS Y SECCIONAMIENTO DE LA IMAGEN 16

CONTINÚA 



CONTINÚA 

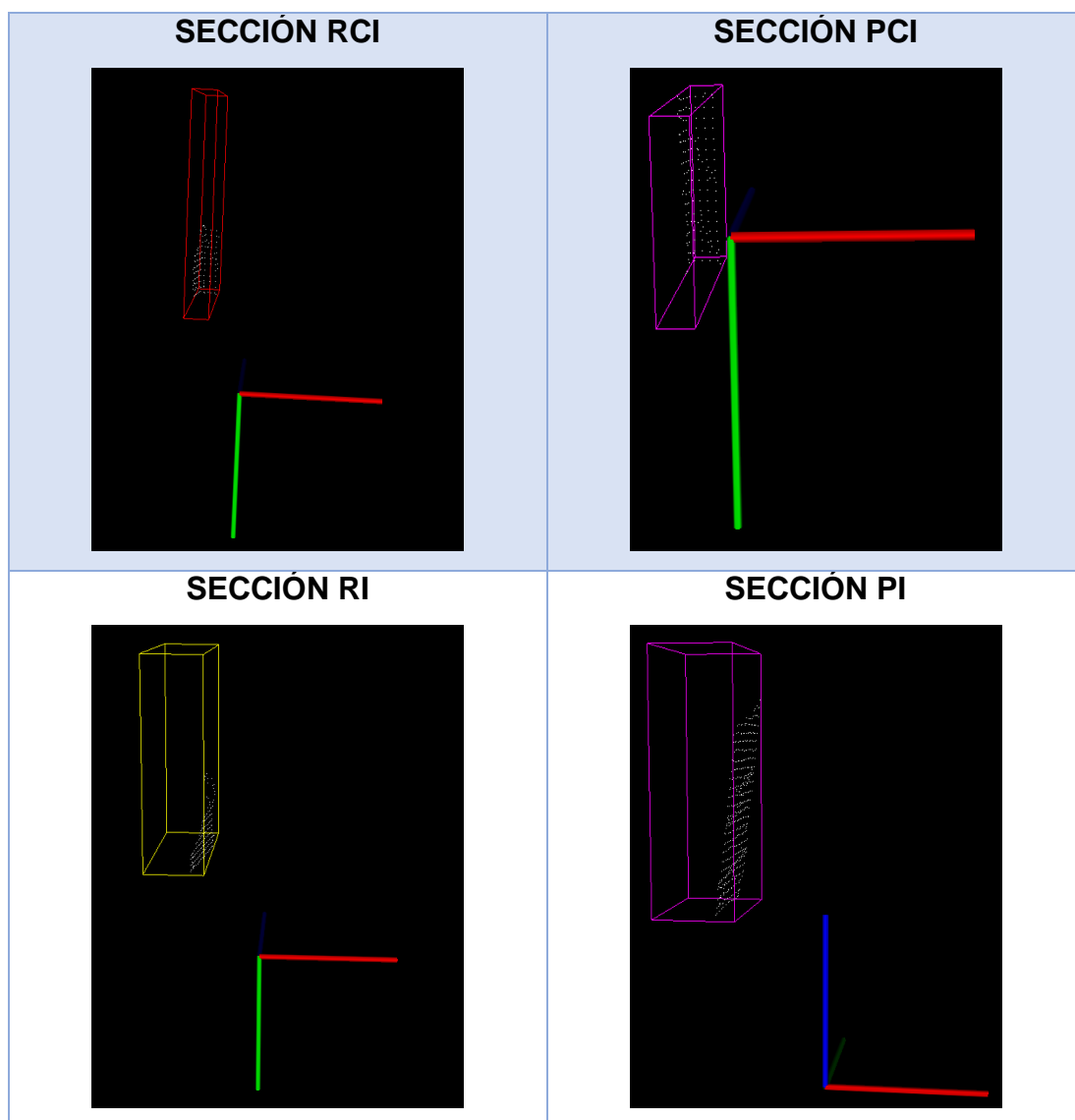


Figura 57 Imagen seccionada para su procesamiento

2.6.5. Establecer una indicación

Dentro del algoritmo, se establecen diez secciones en las que se determina la presencia o ausencia de obstáculos, los límites para cada uno de estos sectores están definidos por valores expuestos en la etapa de extracción anteriormente detallada en el literal 2.6.D.b y 2.6.D.c. Bajo estas consideraciones las posibles acciones son los señalados en la tabla 10:

TABLA 10

Indicaciones de posibles acciones a tomar ante la presencia de obstáculos.

INDICACIÓN
Siga caminando
Obstrucción total
Vaya hacia la derecha
Vaya hacia la izquierda

El algoritmo desarrollado presenta resultados en forma visual y auditiva, para la salida auditiva se emplea la tarjeta de sonido 7.1 Channel Sound (figura 58) y se la configura para su reconocimiento en la BeagleBone Black, además de un par de audífonos como interfaz con el usuario, se cuenta con cuatro tonos a diferente frecuencia y duración para distinguir cada una de las salidas de respuesta.



Figura 58 Channel Sound 7.1

Fuente: (Salomón, 2016)

En la figura 59 se observa la imagen a procesar capturada con el sensor Asus Xtion Pro Live en Point Cloud Library, mientras que la imagen obtenida después del procesamiento de la misma se muestra en la figura 60 con las

secciones en las que se divide la imagen para determinar la presencia de obstáculos.



Figura 59 Imagen capturada con Point Cloud Library

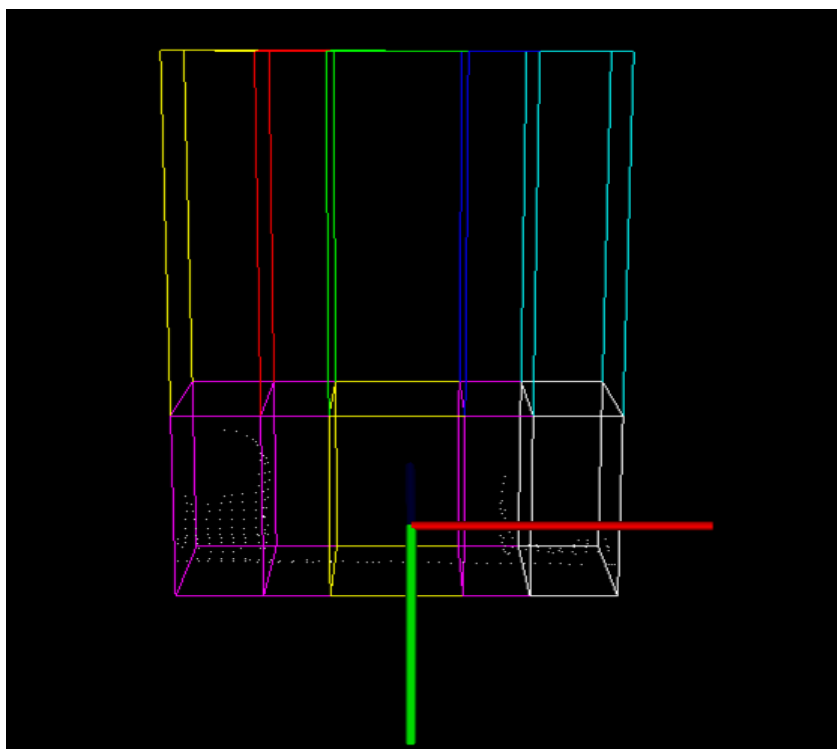


Figura 60 Imagen filtrada y seccionada.

```

1 PointCloud before filtering: 367200 data points.
2 PointCloud after filtering: 16599 data points.
3 SIN ROTULOS A LA IZQUIERDA      RI=1
4 SIN ROTULOS CENTRO IZQUIERDA   RCI=1
5 SIN ROTULOS CENTRO             RC=1
6 SIN ROTULOS CENTRO UNO         RC1=1
7 SIN ROTULOS CENTRO DOS         RC2=1
8 SIN ROTULOS CENTRO DERECHA     RCD=1
9 SIN ROTULOS DERECHA            RD=1
10 OBSTACULOS PISO IZQUIERDA      PI=0
11 SIN OBSTACULOS PISO CENTRO IZQUIERDA PCI=1
12 SIN OBSTACULOS PISO CENTRO    PC=1
13 SIN OBSTACULOS PISO CENTRO uno PC1=1
14 SIN OBSTACULOS PISO CENTRO dos PC2=1
15 OBSTACULOS PISO CENTRO DERECHA PCD=0
16 OBSTACULOS PISO DERECHA       PD=0
17 -----
18                               SELECCION DEL CAMINO
19 CAMINE NOMAS....PASO LIBRE
20
21

```

Figura 61 Salida de respuesta escrita.

En la primera línea de la figura 61 se observa la cantidad de puntos que conforman la imagen original adquirida (figura 59), la segunda línea presenta la cantidad de puntos que conforman la nueva nube después de eliminar NaNs y realizar el proceso de downsampling. Las líneas 3-16 indican la salida obtenida en cada sección respecto a la presencia o ausencia de obstáculos, mismas que son de utilidad para la determinación de la posible acción a tomar por el usuario, la cual se representa en la línea 19 de la figura, en este caso un paso libre para caminar.

2.6.6. Simbología

Estado en “1”: Zona libre de obstáculos, es decir, paso libre.

Estado en “0”: Zona obstruida de forma total o parcial, paso peligroso.

&&: Comparación “AND”.

||: Comparación “OR”.

2.7. Implementación del dispositivo

Para la implementación del dispositivo se tuvieron en cuenta dos posibles diseños el primero como un bastón y el segundo como un cinturón; las características de cada uno de ellos se detallan a continuación:

2.7.1 Bastón

- Estructura

El bastón está construido en metal y su diseño se desarrolló en función de las características de funcionamiento del sensor, es así que se cuenta con una base colocada estratégicamente a 0.60 m del suelo sobre la que descansa el sensor Asus Xtion Pro Live, además de un mango regulable según la necesidad y la comodidad de la persona que lo utilice. Por características propias de la cámara se tiene en cuenta que debe mantenerse lo más estable posible, razón por la cual el bastón se sostiene sobre cuatro ruedas que permiten su movilización como se muestra en la figura 62.



Figura 62 Bastón

- Ventajas

La cámara se mantiene en una posición fija a una altura ideal, lo que asegura una captura de las imágenes adecuada.

Dependiendo del terreno se reducen las vibraciones que puede sufrir la cámara y que generan errores en la captura de imágenes.

Se obtiene un amplio ángulo de visión desde el suelo hasta 1.7 m. aproximadamente, permitiendo la detección obstáculos bajos.

- Desventajas

La persona que utiliza el bastón implementado, debe prescindir de su bastón habitual lo que repercute en la comodidad del mismo y puede generar confusión en la persona.

El bastón sólo puede ser utilizado en superficies planas y con baja fricción.

Si el terreno no es plano, se producirá vibraciones que afectan al dispositivo.

2.7.2. Cinturón

- Estructura

La implementación de un cinturón, se tuvo en consideración para superar las desventajas del primer diseño (literal a. de esta sección), para este diseño el sensor se sujeta en un cinturón que se lleva cómodamente a nivel de la cintura del usuario.

- Ventajas

Cumple con el objetivo de ser un dispositivo de apoyo para la persona con discapacidad visual, ya que quien lo emplea puede seguir utilizando su bastón habitual, pero cuenta con la ventaja de recibir sonidos anticipados de la presencia de obstáculos principalmente elevados, que no son detectados por su bastón.

Su uso no depende del suelo por el que se moviliza la persona no vidente.

Brinda mayor comodidad para el usuario.

- Desventajas

Se pierde visión de obstáculos de baja altura, o que se hallan a nivel del suelo.

Se puede sufrir de detecciones erróneas según la forma en la que la persona no vidente maneja el bastón, ya que si cruza su mano por el frente de la cámara la salida será errónea.

El movimiento del cuerpo de la persona que lleva el cinturón también afecta a la captura de las imágenes y por ende a la respuesta de salida.

CAPÍTULO III

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

3.1. Pruebas de funcionamiento y análisis de resultados

Bajo la consideración del objetivo principal del proyecto, se determinaron las principales dificultades que una persona no vidente presenta para movilizarse de forma segura y bajo este precepto se realizaron pruebas para determinar el funcionamiento tanto del algoritmo desarrollado como de los dispositivos empleados según sus características, y así establecer su eficiencia tanto en detección de diversos obstáculos, comportamiento del dispositivo ante diversos ambientes y comportamiento del dispositivo a diferentes niveles y distancias como se detalla a continuación:

3.1.1. Pruebas del campo de visión del sensor Asus Xtion Pro Live.

3.1.2. Pruebas de detección de presencia de obstáculos:

- A. Presencia de obstáculos en el suelo.
- B. Presencia de obstáculos elevados.
- C. Presencia de obstáculos a diferentes profundidades.
- D. Presencia de obstáculos de diferentes materiales.
- E. Presencia de obstáculos de diferentes formas.
- F. Presencia de obstáculos de diferentes espesores.

3.1.3. Pruebas de comportamiento del dispositivo ante diversos ambientes:

- A. Ambientes interiores, a diferentes horas del día y bajo influencia de luz artificial, luz solar y ausencia de luz.
- B. Ambientes exteriores, a diferentes horas del día y bajo influencia de luz artificial, luz solar y ausencia de luz.

3.1.4. Pruebas de funcionamiento del Algoritmo

3.1.5. Pruebas de funcionamiento del dispositivo colocado a diferentes niveles desde el suelo y a diferentes distancias de la cámara al obstáculo.

Desarrollo de Pruebas

3.1.1. Pruebas del campo de visión del sensor Asus Xtion Pro Live

Para las pruebas del campo de visión del sensor se tienen en consideración las características planteadas en el capítulo 2 sección 5 literal A, para ello se colocó la cámara a una altura de 0.6 m desde el suelo, se consideró un ángulo de visión de la cámara de 45° y se tomaron medidas del rango de visión alcanzado en el eje Y al variar la profundidad del objeto a la cámara, los valores obtenidos se detallan en la tabla 11.

Tabla 11 Prueba de rango de visión de la cámara Asus Xtion Pro Live

DISTANCIA DEL SENSOR AL OBJETO	0.5 m	1.5 m	2.5 m
ALTURA CALCULADA EJE Y	0.81	1.22	1.64
ALTURA MEDIDA EJE Y	0.88	1.24	1.60

En las figuras 63 y 64 respectivamente, se puede observar los valores del rango de visión del sensor para una distancia de 0.5 m de la cámara al objeto, la primera de ellas con los valores calculados (ideales) y la segunda con los valores medidos (reales) al momento de capturar la imagen.

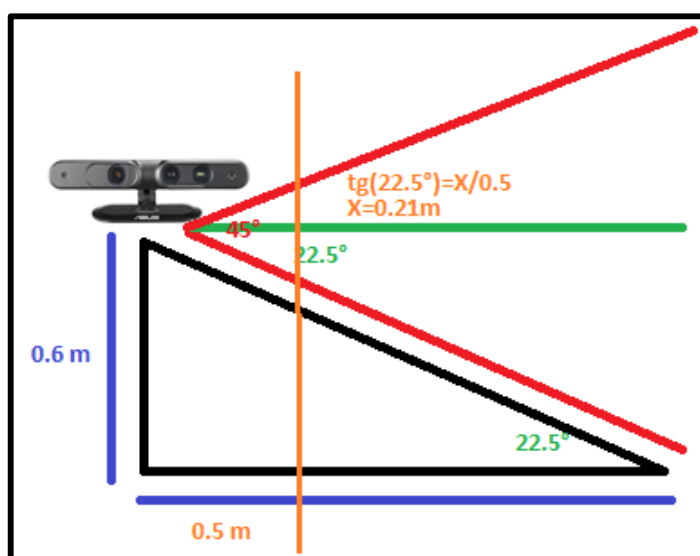


Figura 63 Valores calculados del Campo de visión a 0.5 m de distancia de la cámara al obstáculo

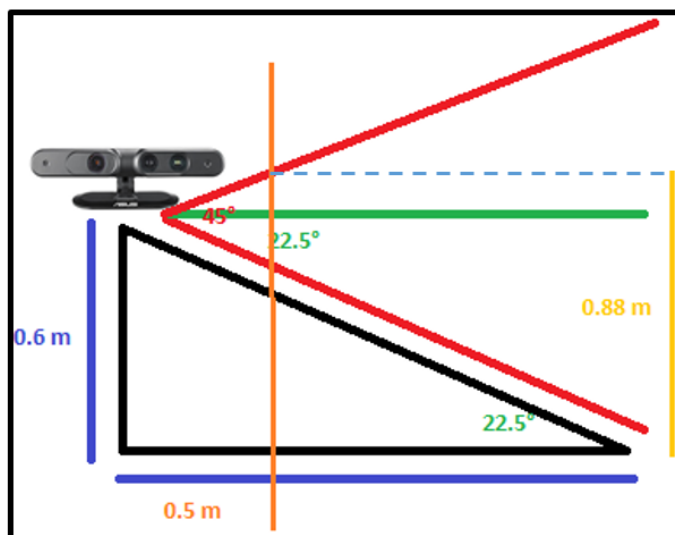


Figura 64 Valores medidos del Campo de visión a 0.5 m de distancia de la cámara al obstáculo

Para una idea más clara del área de visión de la cámara Asus, la figura 65 muestra una imagen frontal capturada con la cámara a 0.60 m desde el suelo y a una distancia de 0.5 m del sujeto, se puede visualizar como toda la parte superior se pierde ya que solo se alcanza a ver 0.81 m en el eje Y aproximadamente.

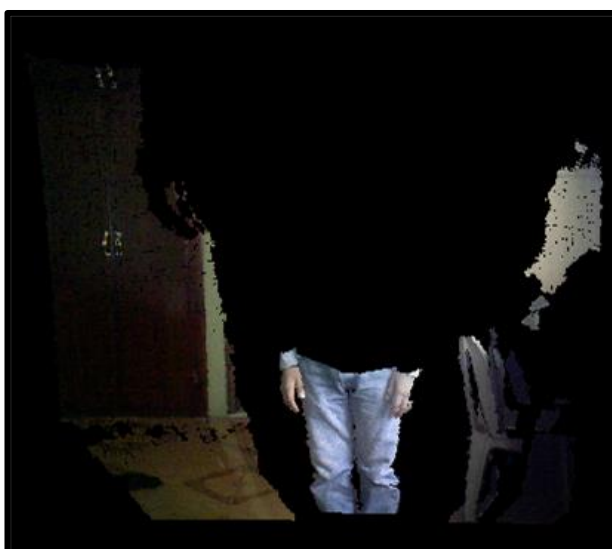


Figura 65 Rango de visión Frontal de Asus a 0.5 m del sujeto.

La figura 66 indica una vista lateral de la imagen capturada (figura 65), teniendo una vista de la forma en la que las imágenes son percibidas.



Figura 66 Rango de visión lateral de Asus a 0.5 m del sujeto

Las figuras 67 y 68 muestran la vista frontal y lateral de la cámara Asus Xtion Pro Live colocada a una distancia de 1.5 m del sujeto de prueba y a 0.60 m del suelo.



Figura 67 Rango de visión frontal de Asus a 1.5 m del sujeto

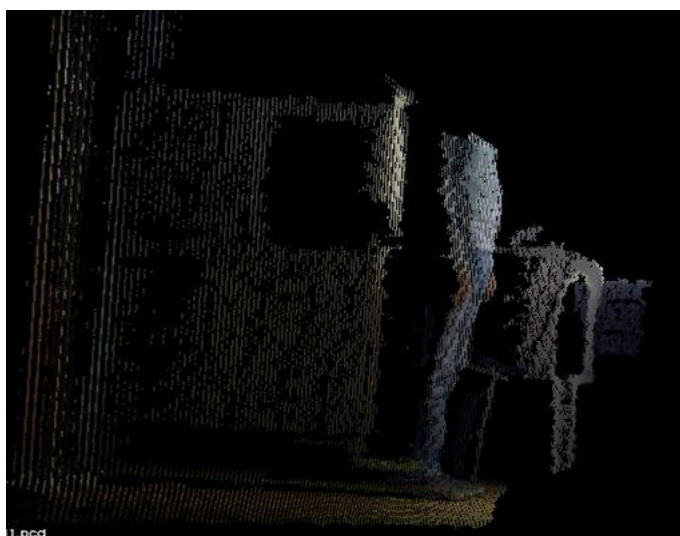


Figura 68 Rango de visión lateral de Asus a 1.5 m del sujeto

Las figuras 69 y 70 muestran la vista frontal y lateral que adquiere la cámara Asus Xtion Pro Live colocada a una distancia de 2.5 m del sujeto de prueba y a 0.60 m del suelo.



Figura 69 Rango de visión frontal de Asus a 2.5 m del sujeto



Figura 70 Rango de visión lateral de Asus a 2.5 m del sujeto

Las pruebas realizadas en este apartado permiten tener la base para el análisis de las imágenes capturadas y definir cuál es la altura idónea a la cual se debe colocar la cámara según la distancia a la cual se desee identificar los obstáculos y por ende los primeros parámetros para el desarrollo del algoritmo sabiendo que el rango de interés en profundidad (eje Z) es de 0.8 m a 1.6 m, además de un área de 1.70 m desde el suelo en el eje Y (altura promedio de una persona).

3.1.2. Pruebas de detección de presencia de obstáculos

A. Presencia de obstáculos en el suelo

Uno de los principales objetivos a alcanzar es lograr identificar la presencia de obstáculos a nivel del suelo que el bastón no logra identificar.

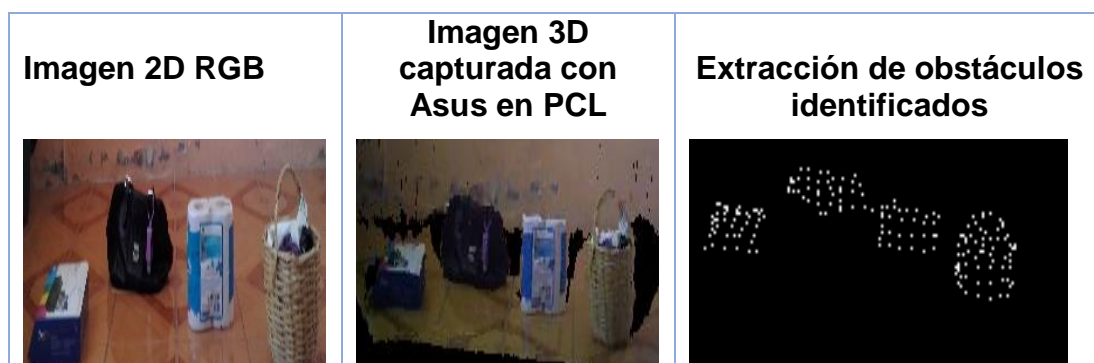


Figura 71 Filtraje y detección de obstáculos a nivel del suelo

Las imágenes mostradas (figura 71), de izquierda a derecha respectivamente, muestran la imagen RGB captada, la imagen 3D captura con la cámara Asus Xtion Pro Live en PCL, y la extracción de obstáculos obtenida después del filtraje y el procesamiento de la imagen 3D capturada.

Como resultado de esta prueba se puede establecer que el algoritmo permite la correcta extracción de obstáculos a nivel del suelo dentro del área de interés, sin embargo, no se obtienen los objetos extraídos en su forma original sino un conjunto de puntos que son una estimación bastante aproximada de los obstáculos que representan

B. Presencia de obstáculos elevados

Entre las principales problemáticas que una persona no vidente enfrenta está la dificultad para saber si existe o no presencia de obstáculos elevados, como rótulos, anuncios u otros objetos colgantes que causan daños físicos directos a la persona no vidente.

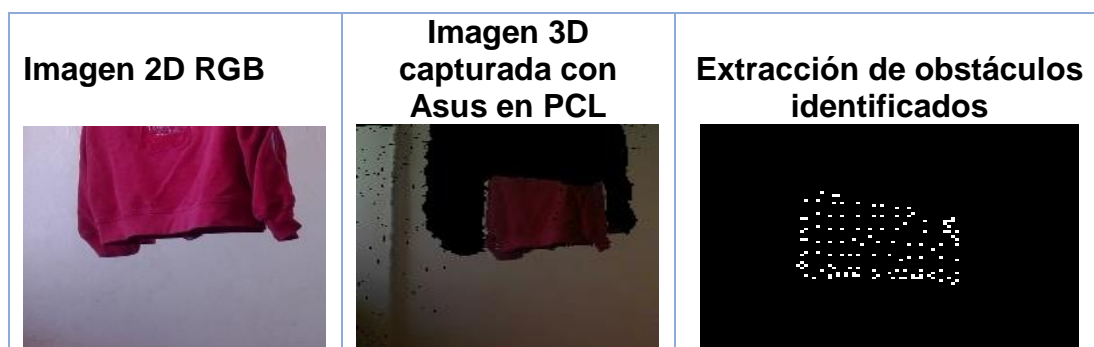


Figura 72 Filtraje y detección de obstáculos elevados

Para comprobar el funcionamiento del dispositivo ante la presencia de obstáculos elevados, se realizó la captura de la imagen de un objeto colgante como se puede ver en la figura 72, la imagen central mostrada es la imagen 3D capturada mientras que la imagen de la derecha muestra la extracción del obstáculo identificado, de forma semejante a los objetos a nivel del suelo se obtiene una nube de puntos que lo representan.

C. Presencia de obstáculos según la profundidad de su ubicación

En la prueba realizada en el capítulo 3, sección B, literal b se determinó el funcionamiento para la detección de obstáculos a nivel del suelo, sin embargo, es imperativo saber la efectividad del algoritmo para detectar obstáculos si estos se hallan a diferentes profundidades y la salida que se obtiene.



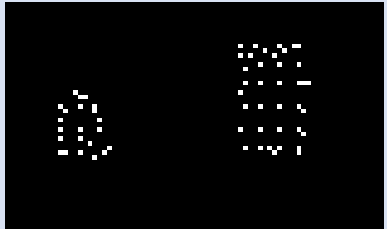


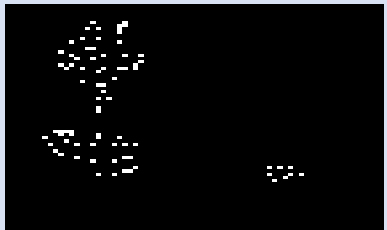








Figura 73 Filtraje y detección de obstáculos a diferentes profundidades

Se logró una salida bastante acertada de los obstáculos identificados como se puede observar en la figura 73, mas es importante tener en cuenta que un objeto más cercano a la cámara elimina parcialmente otro objeto si éste se halla ubicado detrás, pero se mantienen adecuadamente las ubicaciones de los mismo en la salida obtenida.

D. Presencia de obstáculos de diferentes materiales.

Los obstáculos con los que una persona no vidente puede colisionar no son de un material específico sino de un sin número de materiales, por lo cual se debe definir el comportamiento del dispositivo ante cada uno de ellos. Las pruebas se realizaron para obstáculos de los materiales más comunes a encontrar tanto en ambientes interiores como exteriores.

Objetos de madera		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos de carácter vegetal		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos de cemento		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos de metal reflectante		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		



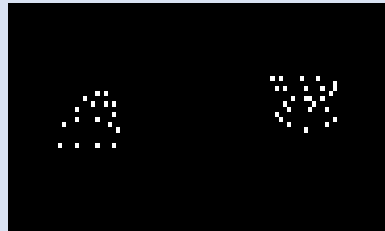





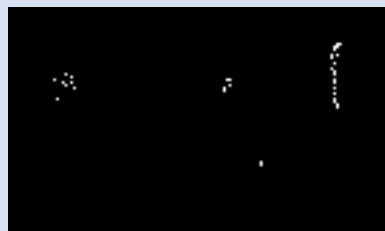


Objetos de metal no reflectante		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos de plástico		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificador
		
Objetos de vidrio		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos de cartón y otros materiales		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		

Figura 74 Filtraje y detección de obstáculos de diferentes materiales

La figura 74 contiene las imágenes 2D, la imagen 3D capturada con la cámara Asus Xtion Pro Live en Point Cloud Library y los obstáculos identificados para cada tipo de materiales de arriba hacia abajo de la figura.

TABLA 12

Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferentes materiales

Objetos según el material	Nivel de detección
Objetos de madera	Excelente
Objetos de carácter vegetal	Muy bueno
Objetos de cemento	Excelente
Objetos de metal reflectante	Muy malo
Objetos de metal no reflectante	Excelente
Objetos de plástico	Muy bueno
Objetos de vidrio	Nulo
Objetos de cartón y otros materiales	Muy bueno

Los resultados presentados en la tabla 12 están basados en los siguientes porcentajes de detección (tabla 13):

TABLA 13

Niveles de detección de obstáculos

Nivel	Detalles
Excelente	Indica una detección aproximada del 85% al 100% del obstáculo.
Muy bueno	Indica una detección aproximada del 68% al 84% del obstáculo.
Bueno	Indica una detección aproximada del 48 % al 67% del obstáculo.
Malo	Indica una detección aproximada del 30 % al 47% del obstáculo.
Muy malo	Indica una detección aproximada del 16 % al 29% del obstáculo.
Nulo	Indica una detección aproximada del 0 % al 15% del obstáculo.

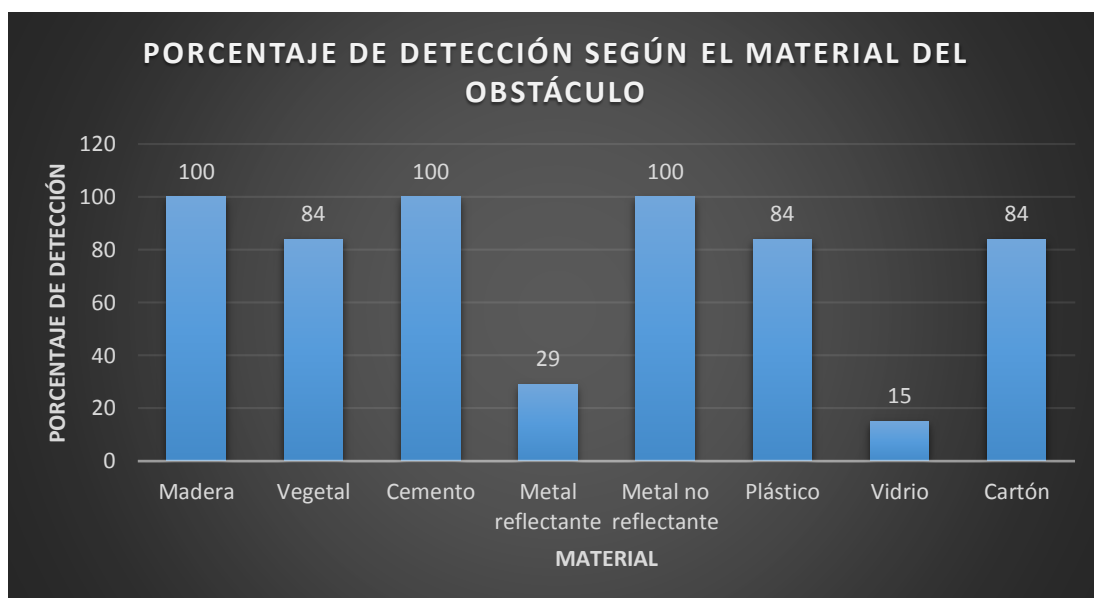


Figura 75 Porcentaje de detección según el material del obstáculo

De los resultados obtenidos en la figura 75 se determinó que los obstáculos de madera, cemento y metal no reflectante se detectan correctamente, los objetos de vidrio son prácticamente imperceptibles por el dispositivo, los obstáculos de carácter vegetal y plástico se detectan en un nivel muy bueno siempre y cuando no sea plástico completamente transparente, ya que en este caso se asemeja al vidrio, y aquellos obstáculos de metal reflectante tienen muy mala detección ya que el reflejo que se produce dificulta este proceso.

E. Presencia de obstáculos de diferentes formas.

Los posibles obstáculos a detectar pueden ser de diversas formas ya sean cuadrados, rectangulares, triangulares, circulares, amorfos, etc. Es así que se realizaron pruebas para establecer cuán eficiente es el dispositivo para identificarlos como se muestra en la figura 76.

Objetos cuadrados – rectangulares		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados

CONTINÚA



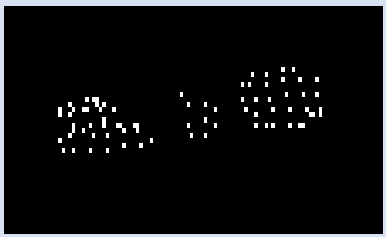





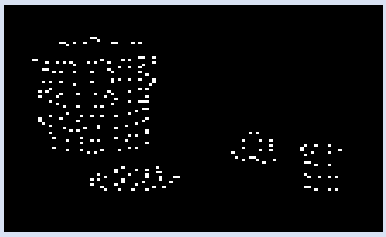


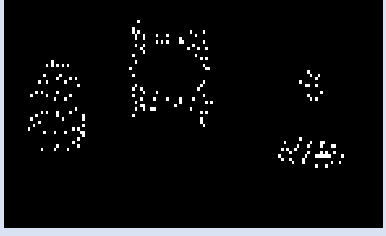
		
Objetos triangulares		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos circulares – elípticos		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Objetos amorfos		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		

Figura 76 Pruebas de Filtrado y detección de obstáculos de diferentes materiales

Los resultados obtenidos al capturar y procesar imágenes con obstáculos de diferentes formas para conocer la eficiencia del dispositivo para detectarlos se presentan en la tabla 14.

TABLA 14

Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferentes formas

Objetos según la forma	Nivel de detección
Objetos cuadrados – rectangulares	Excelente
Objetos triangulares	Excelente
Objetos circulares – elípticos	Excelente
Objetos amorfos	Excelente

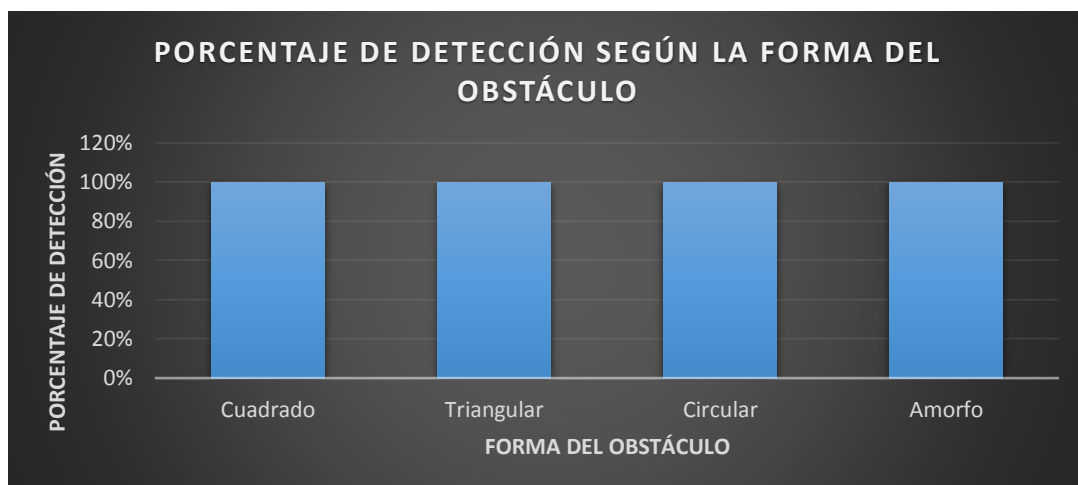


Figura 77 Porcentaje de detección según la forma del obstáculo

De los resultados obtenidos en la figura 77 se puede establecer que la forma de los objetos no tiene influencia en la detección de los mismos, ya que independientemente de ella son detectados sin excepción. El nivel de detección señalado hace referencia a lo detallado en la tabla 13.

F. Presencia de obstáculos de diferentes espesores.

Los objetos utilizados para esta prueba tienen un espesor de 0.03 m hasta 0.08 m aproximadamente para poder discernir desde que espesor se pueden detectar los obstáculos, sabiendo que valores de espesor superiores se comprobó que son detectados.

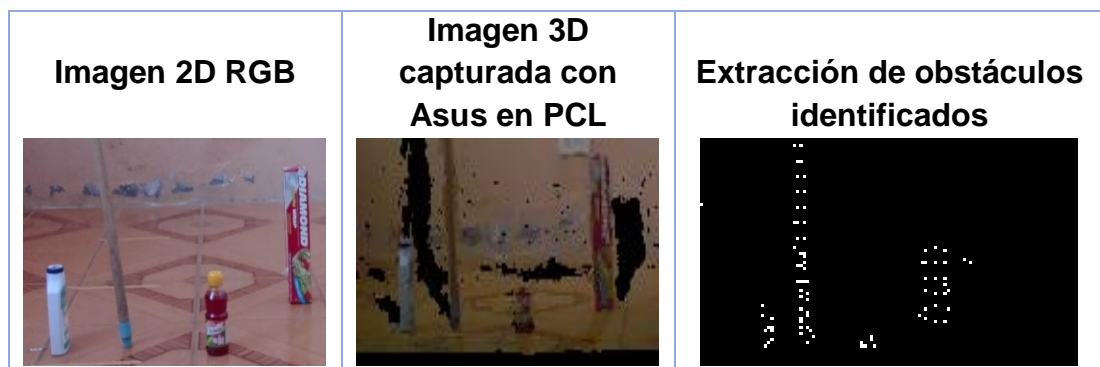


Figura 78 Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos de diferente espesor

Como se observa en la imagen de la derecha en la figura 78, obstáculos bastante delgados con un espesor de 0.03 m en adelante ya son detectados, sin embargo, hay que considerar que el material del cual están formados influye directamente a la salida de respuesta obtenida.

TABLA 15

Resultados del filtraje y detección de obstáculos de diferente espesor

Espesor de objetos	Nivel de detección
0.001 a 0.02 m	Malo
0.03 m en adelante	Excelente- Muy Bueno

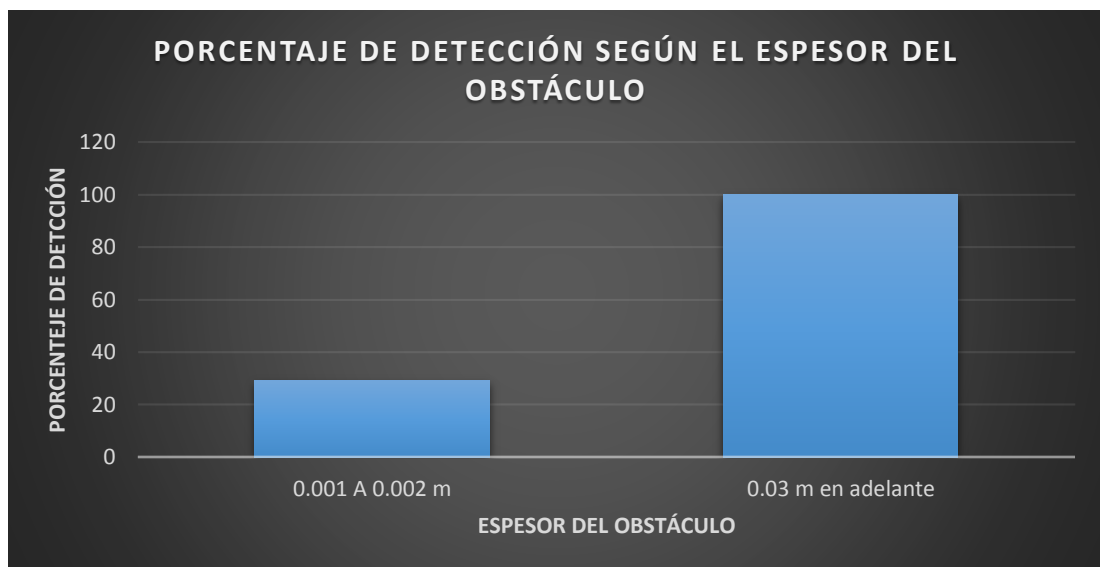


Figura 79 Porcentaje de detección según el espesor del obstáculo

Los resultados presentados en la tabla 15, se obtienen considerando lo descrito en la tabla 13, se puede notar en la figura 79 que para obstáculos de un espesor menor a 0.03 m no se tiene una buena detección, por el contrario, para espesores superiores la detección se realiza de forma idónea, obviamente influenciado por el material del cual están contruidos.

3.1.3. Pruebas de comportamiento del dispositivo ante diversos ambientes

Una vez establecidos los tipos de materiales, las formas, los espesores, y otros factores propios de los obstáculos a detectar, es necesario verificar cuanto influye el ambiente en el cual se prueba el dispositivo como son ambientes cerrados y ambientes externos, y como afecta la luz tanto artificial como solar a la respuesta del dispositivo.

A. Ambientes interiores, a diferentes horas del día y bajo influencia de luz artificial, luz solar y ausencia de luz.

Las pruebas se realizaron en una habitación (ambiente cerrado), bajo tres condiciones diferentes de luminosidad, la primera de ellas con luz artificial (foco), la segunda con influencia de luz solar (puerta de la habitación abierta para permitir el ingreso de luz solar) y finalmente la captura de una imagen en oscuridad dentro del mismo ambiente.



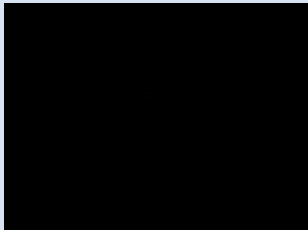

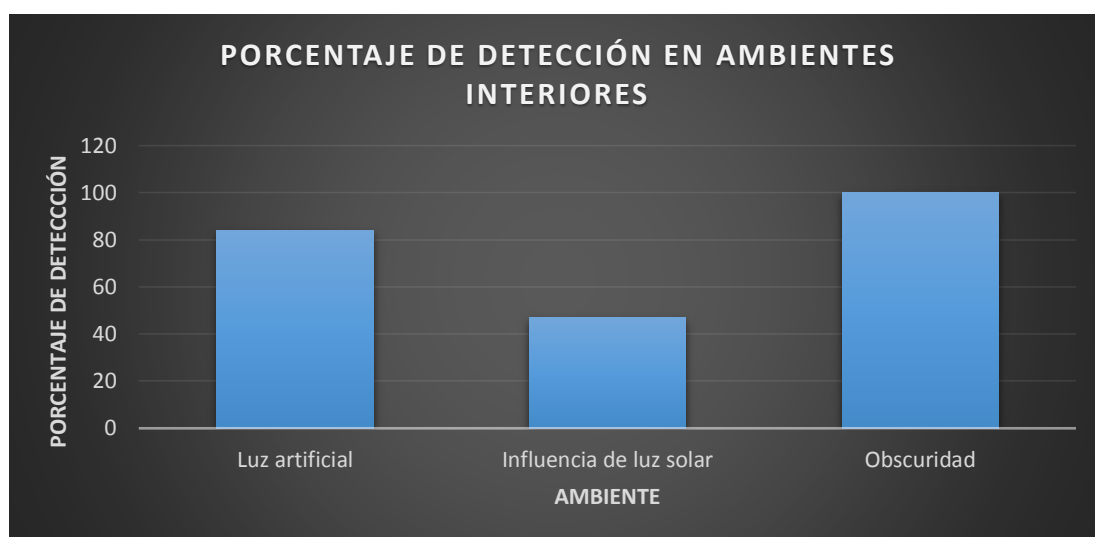
Ambiente cerrado con luz artificial		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Ambiente cerrado con influencia de luz solar		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		
Pruebas en oscuridad		
Imagen 2D RGB	Imagen 3D capturada con Asus en PCL	Extracción de obstáculos identificados
		

Figura 80 Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos en ambiente cerrado (habitación)

TABLA 16

Resultados del filtraje y detección de obstáculos en ambiente cerrado

Prueba en interiores	Nivel de detección
Pruebas con luz artificial (n luxes)	Muy bueno
Pruebas con influencia de luz solar	Malo
Pruebas en oscuridad	Excelente

**Figura 81** Porcentaje de detección en ambientes interiores

Los datos presentados en la tabla 16 muestran los resultados de detección obtenidos para cada uno de los diferentes niveles de luminosidad como se muestra en la figura 81, pudiendo determinar que con luz artificial el nivel de detección es muy bueno; con influencia de luz solar la detección se ve afectada ya que ciertas partes del obstáculo no son captadas en la imagen y por ende no aparece en su totalidad al momento del filtraje; mientras que en un ambiente sin luz, es decir, en oscuridad, los obstáculos se detectan de manera excelente, lo que significa un 100% de detección, ya que estos niveles están en base a los definidos en la tabla 13.

B. Ambientes exteriores a diferentes horas del día, y bajo influencia de luz solar y ausencia de luz.

En el literal a. de esta sección se estableció que el dispositivo se ve afectado por la influencia de luz solar, por ello, las pruebas a continuación fueron realizadas en ambiente externo a distintas horas del día, la primera de ellas al medio día cuando se tiene una gran cantidad de luz solar y la segunda a media tarde cuando la luz solar ya no afecta directamente al dispositivo, tal como se muestra en la figura 82.



CONTINÚA 

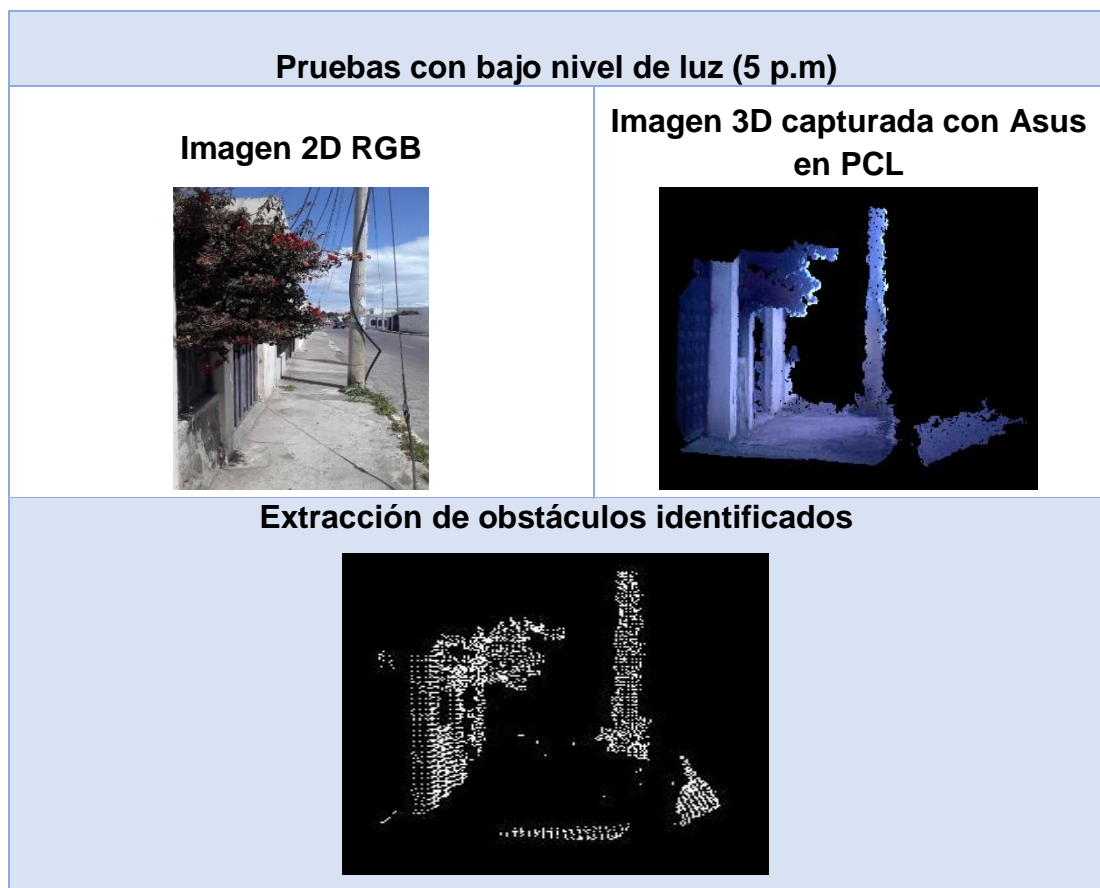


Figura 82 Pruebas de Filtraje y detección de obstáculos en ambiente externo

Los resultados del nivel de detección de obstáculos obtenidos en ambiente externo a las 12 pm y a las 5 pm se muestran en la tabla 17, bajo las condiciones detalladas en la tabla 13.

TABLA 17

Resultados del filtraje y detección de obstáculos en ambiente externo

Prueba en exteriores	Nivel de detección
Pruebas con luz solar (12 pm)	Nula
Pruebas con bajo nivel de luz (5 pm)	Muy bueno

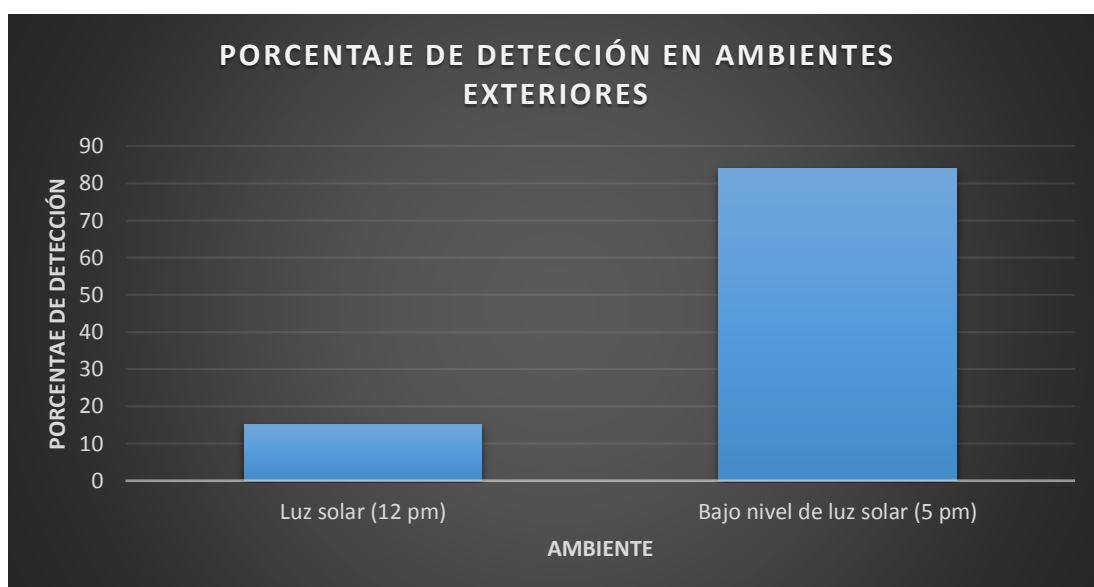


Figura 83 Porcentaje de detección en ambientes exteriores

De los resultados obtenidos en la figura 83 se determinó que la luz solar es un factor ambiental que limita el funcionamiento del dispositivo puesto que, ante su influencia directa, no recibe ninguna imagen a ser procesada y no se puede obtener una respuesta de salida tal como lo demuestra la imagen en 3D adquirida por Asus Xtion Pro Live en PCL y la imagen 3D filtrada presentada en la segunda y tercera imagen de la figura 80 (prueba con luz solar 12 pm).

Por el contrario, a media tarde (5 pm aproximadamente) el dispositivo funciona normalmente con cierto grado de pérdidas de información por ligera presencia de luz solar aun presente en el ambiente tal como se muestra en la misma figura 82.

De lo anteriormente expuesto se establece que el dispositivo puede ser utilizado con mayor eficiencia por personas con discapacidad visual moderada y la discapacidad visual grave que desde el punto de vista funcional, pueden considerarse como personas con “baja visión” puesto que poseen un resto visual suficiente para determinar la cantidad de luz existente en el ambiente. Los usuarios deben orientarse por este nivel y emplear al dispositivo con propósitos funcionales durante el día, en tanto que el dispositivo ayudaría principalmente en casos de bajo nivel de luz que incrementa el riesgo de

accidentes. Para personas con ceguera total el dispositivo puede servir como un dispositivo de entrenamiento y ayuda durante horarios específicos del día ya que una persona con ceguera no distingue en forma alguna la presencia a ausencia de luz ambiental.

3.1.4. Pruebas de funcionamiento del Algoritmo

Una vez conocidas las limitaciones y el funcionamiento del dispositivo según las características de los equipos empleados, en esta sección se detallan las pruebas realizadas para establecer el correcto funcionamiento del algoritmo desarrollado, y verificar que la respuesta de salida es adecuada. Para este fin se realizaron cuatro pruebas detalladas a continuación.

A. Prueba 1

Se colocó el dispositivo a una altura de 0.60 m y se colocaron obstáculos (dos cajas de cartón) a una distancia aproximada de 1.50 m del mismo, separados entre sí de tal manera que entre ellos exista un espacio considerable como camino libre para la circulación de una persona para comprobar la respuesta de salida del dispositivo.

Para una mejor comprensión, en la parte superior de la figura 84, se muestra la imagen percibida por Asus Xtion Pro Live, tanto por el sensor (izquierda) como por la cámara RGB (derecha), en la parte central superior de la misma figura se puede ver la imagen 3D capturada en Point Cloud Library, debajo de ella la imagen 3D procesada, filtrada y dividida en secciones para el análisis del posible camino a tomar.

En la parte inferior la figura 84 se tiene la captura de pantalla de la salida del algoritmo en la que se puede observar los resultados de presencia o ausencia de obstáculos en cada sección además de la indicación del posible camino a tomar por el usuario que en este caso es “CAMINO LIBRE” lo que corrobora el funcionamiento correcto del algoritmo.

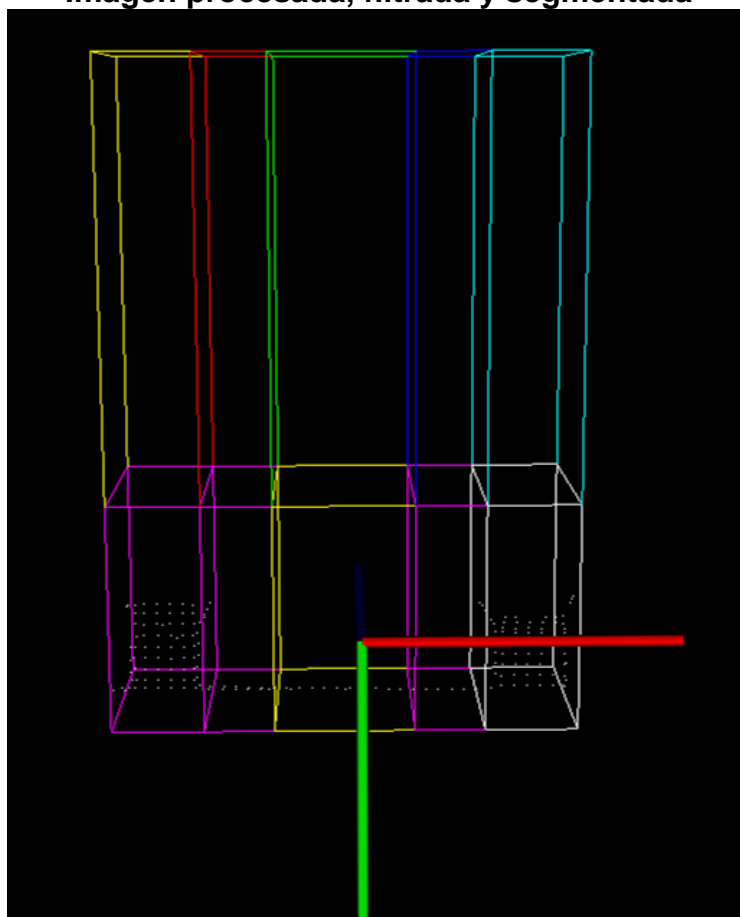
Imagen Captada por ASUS XTION PRO LIVE



Imagen capturada en Point Cloud Library



Imagen procesada, filtrada y segmentada



CONTINÚA 

Respuesta escrita del algoritmo

```

PointCloud before filtering: 307200 data points.
PointCloud after filtering: 18289 data points.
SIN ROTULOS A LA IZQUIERDA          RI=1
SIN ROTULOS CENTRO IZQUIERDA      RCI=1
SIN ROTULOS CENTRO                RC=1
SIN ROTULOS CENTRO UNO            RC1=1
SIN ROTULOS CENTRO DOS            RC2=1
SIN ROTULOS CENTRO DERECHA        RCD=1
SIN ROTULOS DERECHA              RD=1
OBSTACULOS PISO IZQUIERDA         PI=0
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO IZQUIERDA  PCI=1
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO        PC=1
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO uno     PC1=1
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO dos     PC2=1
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO DERECHA  PCD=1
OBSTACULOS PISO DERECHA           PD=0
-----
                               SELECCION DEL CAMINO
CAMINE NOMAS.....PASO LIBRE

```

Figura 84 Prueba 1: funcionamiento del algoritmo

B. Prueba 2

Para la segunda prueba se mantuvo el dispositivo a una altura de 0.60 m y se colocaron obstáculos (tres cajas de cartón) a una distancia aproximada de 1.50 m del mismo, separados entre sí, de tal manera que el camino se halle bloqueado de forma total impidiendo el paso del usuario, para comprobar la respuesta de salida del dispositivo.

En la parte superior de la figura 85, se muestra la imagen percibida por Asus Xtion Pro Live, tanto por el sensor (izquierda) como por la cámara RGB (derecha), en la parte central superior de la misma figura se puede ver la imagen 3D capturada en Point Cloud Library, debajo de ella la imagen 3D procesada, filtrada y dividida en secciones para el análisis del posible camino a tomar.

En la parte inferior la figura 85 se tiene una captura de pantalla de la salida del algoritmo en la que se puede observar los resultados de presencia o ausencia de obstáculos en cada sección, además de la indicación del posible camino a tomar por el usuario que en este caso es “OBSTÁCULO TOTAL” lo que corrobora el funcionamiento correcto del algoritmo.

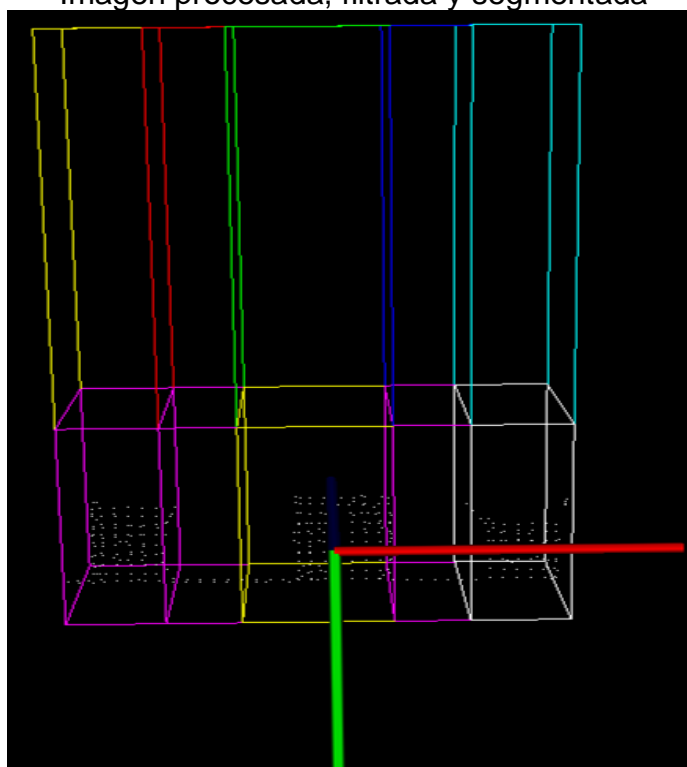
Imagen Captada por ASUS XTION PRO LIVE



Imagen capturada en Point Cloud Library



Imagen procesada, filtrada y segmentada

CONTINÚA 

Respuesta escrita del algoritmo

```

PointCloud before filtering: 307200 data points.
PointCloud after filtering: 17291 data points.
SIN ROTULOS A LA IZQUIERDA          RI=1
SIN ROTULOS CENTRO IZQUIERDA      RCI=1
SIN ROTULOS CENTRO          RC=1
SIN ROTULOS CENTRO UNO          RC1=1
SIN ROTULOS CENTRO DOS          RC2=1
SIN ROTULOS CENTRO DERECHA      RCD=1
SIN ROTULOS DERECHA            RD=1
OBSTACULOS PISO IZQUIERDA        PI=0
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO IZQUIERDA  PCI=1
OBSTACULOS PISO CENTRO          PC=0
OBSTACULOS PISO CENTRO uno          PC1=0
OBSTACULOS PISO CENTRO dos          PC2=0
OBSTACULOS PISO CENTRO DERECHA      PCD=0
OBSTACULOS PISO DERECHA            PD=0
.....
                                SELECCION DEL CAMINO
OBSTACULO TOTAL
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.rear
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.center_lfe
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.side
ALSA lib pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map
ALSA lib pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map

```

Figura 85 Prueba 2: funcionamiento del algoritmo

C. Prueba 3.

En la tercera prueba se mantuvo el dispositivo a una altura de 0.60 m y se colocaron obstáculos (dos cajas de cartón) a una distancia aproximada de 1.50 m del mismo, separados entre sí, de tal manera que el camino por la parte central y la parte izquierda se halle bloqueado para caminar, mientras que exista paso solamente por el lado derecho del camino, para comprobar la respuesta de salida del dispositivo.

En la parte superior de la figura 86, se muestra la imagen percibida por Asus Xtion Pro Live, tanto por el sensor (izquierda) como por la cámara RGB (derecha), en la parte central superior de la misma figura se puede ver la imagen 3D capturada en Point Cloud Library, debajo de ella la imagen 3D procesada, filtrada y dividida en secciones para el análisis del posible camino a tomar.

En la parte inferior la figura 86 se tiene la captura de la pantalla de salida del algoritmo en la que se puede observar los resultados de presencia o ausencia de obstáculos en cada sección, además de la indicación del posible camino a tomar por el usuario que en este caso es “PASO POR LA DERECHA” lo que corrobora el funcionamiento correcto del algoritmo.

Prueba 3

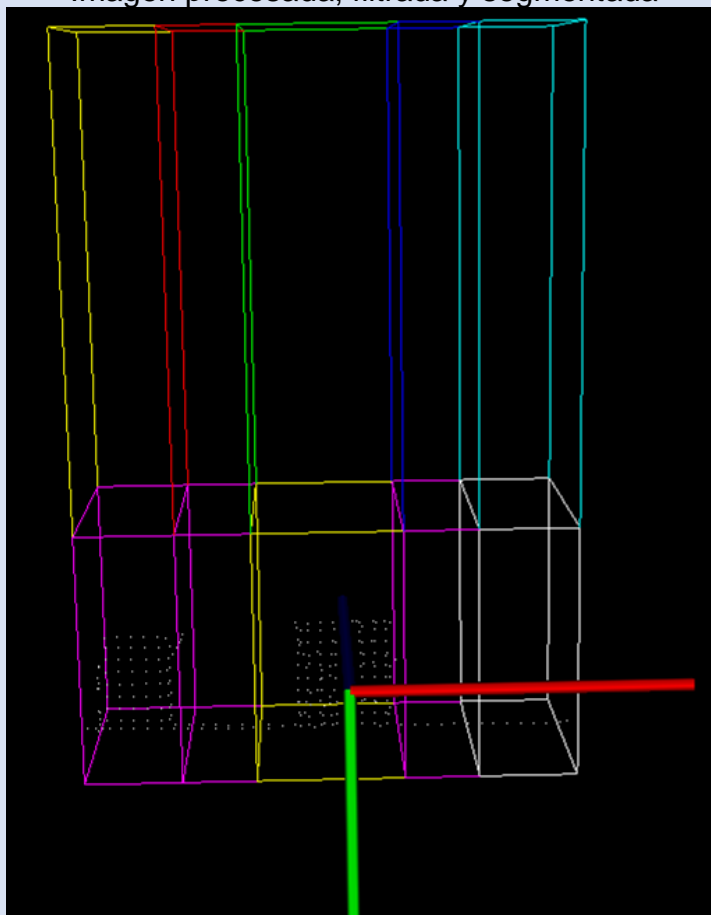
Imagen Captada por ASUS XTION PRO LIVE



Imagen capturada en Point Cloud Library



Imagen procesada, filtrada y segmentada



CONTINÚA →

Respuesta escrita del algoritmo

```

PointCloud before filtering: 387280 data points.
PointCloud after filtering: 17774 data points.
SIN ROTULOS A LA IZQUIERDA RI=1
SIN ROTULOS CENTRO IZQUIERDA RC1=1
SIN ROTULOS CENTRO RC=1
SIN ROTULOS CENTRO UNO RC1=1
SIN ROTULOS CENTRO DOS RC2=1
SIN ROTULOS CENTRO DERECHA RCD=1
SIN ROTULOS DERECHA RD=1
OBSTACULOS PISO IZQUIERDA PI=0
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO IZQUIERDA PCI=1
OBSTACULOS PISO CENTRO PC=0
OBSTACULOS PISO CENTRO uno PC1=0
OBSTACULOS PISO CENTRO dos PC2=0
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO DERECHA PCD=1
SIN OBSTACULOS PISO DERECHA PD=1
.....
SELECCION DEL CAMINO
PASO POR LA DERECHA
ALSA llb pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.rear
ALSA llb pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.center_lfe
ALSA llb pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.side
ALSA llb pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map
ALSA llb pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map

```

Figura 86 Prueba 3: funcionamiento del algoritmo

D. Prueba 4.

En la tercera prueba se mantuvo el dispositivo a una altura de 0.60 m y se colocaron obstáculos (dos cajas de cartón) a una distancia aproximada de 1.50 m del mismo, separados entre sí, de tal manera que el camino por la parte central y la parte derecha se halle bloqueado para caminar, mientras que exista paso solamente por el lado izquierdo del camino, para comprobar la respuesta de salida del dispositivo.

En la parte superior de la figura 87, se muestra la imagen percibida por Asus Xtion Pro Live, tanto por el sensor (izquierda) como por la cámara RGB (derecha), en la parte central superior de la misma figura se puede ver la imagen 3D capturada en Point Cloud Library, debajo de ella la imagen 3D procesada, filtrada y dividida en secciones para el análisis del posible camino a tomar.

En la parte inferior de la figura 87 se tiene la captura de pantalla de salida del algoritmo en la que se puede observar los resultados de presencia o ausencia de obstáculos en cada sección además de la indicación del posible camino a tomar por el usuario que en este caso es “PASO POR LA IZQUIERDA” lo que corrobora el funcionamiento correcto del algoritmo.

Imagen Captada por ASUS XTION PRO LIVE



Imagen capturada en Point Cloud Library

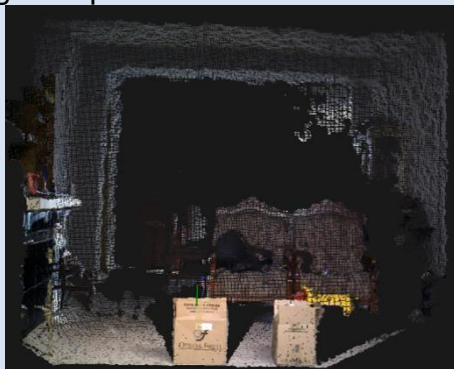
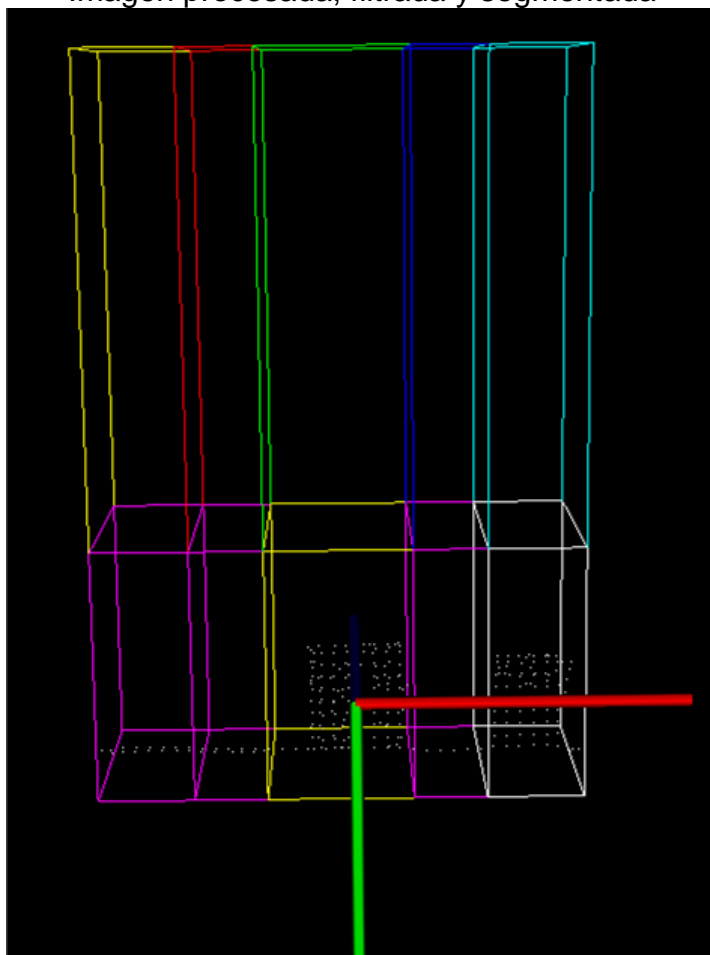


Imagen procesada, filtrada y segmentada

CONTINÚA 

Respuesta escrita del algoritmo

```

PointCloud before filtering: 307200 data points.
PointCloud after filtering: 19193 data points.
SIN ROTULOS A LA IZQUIERDA          RI=1
SIN ROTULOS CENTRO IZQUIERDA      RCI=1
SIN ROTULOS CENTRO                 RC=1
SIN ROTULOS CENTRO UNO             RC1=1
SIN ROTULOS CENTRO DOS             RC2=1
SIN ROTULOS CENTRO DERECHA        RCD=1
SIN ROTULOS DERECHA               RD=1
SIN OBSTACULOS PISO IZQUIERDA     PI=1
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO IZQUIERDA PCI=1
OBSTACULOS PISO CENTRO            PC=0
OBSTACULOS PISO CENTRO uno        PC1=0
OBSTACULOS PISO CENTRO dos        PC2=0
SIN OBSTACULOS PISO CENTRO DERECHA PCD=1
OBSTACULOS PISO DERECHA           PD=0
-----
                          SELECCION DEL CAMINO
PASO POR LA IZQUIERDA
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.rear
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.center_lfe
ALSA lib pcm.c:2267:(snd_pcm_open_noupdate) Unknown PCM cards.pcm.side
ALSA lib pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map
ALSA lib pcm_route.c:867:(find_matching_chmap) Found no matching channel map

```

Figura 87 Prueba 4: funcionamiento del algoritmo

E. Análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento del algoritmo

Una vez realizadas las cuatro pruebas detalladas previamente en esta sección, se determinó que el algoritmo está funcionando de manera correcta y que la respuesta obtenida es acertada en un 100% para la selección del camino tanto en la salida escrita como auditiva.

Además de lo anteriormente expuesto se determinó que las secciones en las que se dividió cada imagen para su análisis fueron adecuadas para establecer el posible camino a tomar, si bien las pruebas realizadas no contienen obstáculos elevados, la detección de los mismos ya fue comprobada en pruebas anteriores.

3.1.5. Pruebas de funcionamiento del dispositivo colocado a diferentes niveles desde el suelo y a diferentes distancias de la cámara al obstáculo.

Las pruebas que se detallan en las tablas 18-37 permiten probar el comportamiento del dispositivo dependiendo de la altura a la que está colocado (diferentes niveles desde el suelo) y las variaciones que produce el

variar la distancia a la que se encuentra el obstáculo de la cámara. Se realizaron tanto en un computador portátil como en la tarjeta BeagleBone Black bajo las mismas condiciones y con el mismo obstáculo (objeto plástico) para establecer las diferencias en tiempo de respuesta y la confiabilidad de la respuesta de salida obtenida.

A. Pruebas realizadas con el sensor a 0.30 m del suelo

Las cinco primeras pruebas corresponden a una altura del sensor de 0.30 m a partir del suelo y se tomaron con cinco valores distintos de distancia entre el obstáculo y el sensor (0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.40 m, 1.60 m) respectivamente.

TABLA 18

Prueba N°1: Prueba de funcionamiento del dispositivo


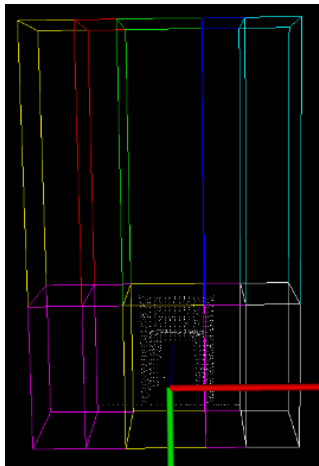
PRUEBA N° 1		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.30	0.30
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	0.80	0.80
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 0.64	0 a 0.64
Tiempo de respuesta en segundos	1.28	1.69
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Obstáculo total	Obstáculo total
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 19 Prueba N°2:

Prueba de funcionamiento del dispositivo


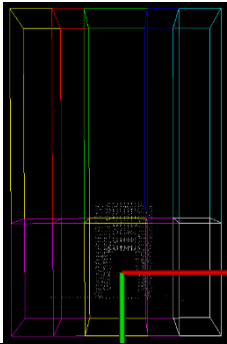
PRUEBA N° 2		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.30	0.30
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.00	1.00
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 0.75	0 a 0.75
Tiempo de respuesta en segundos	1.30	1.66
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Obstáculo total	Obstáculo total
Asertividad de respuesta	0 %	0%

TABLA 20

Prueba N°3: Prueba de funcionamiento del dispositivo


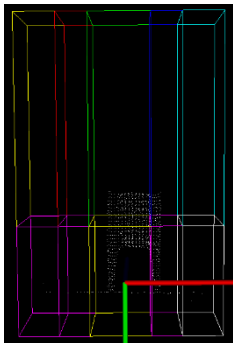
PRUEBA N° 3		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.30	0.30
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.20	1.20
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 0.86	0 a 0.86
Tiempo de respuesta en segundos	1.25	1.96
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Obstáculo total	Obstáculo total
Asertividad de respuesta	0 %	0%

TABLA 21

Prueba N°4: Prueba de funcionamiento del dispositivo


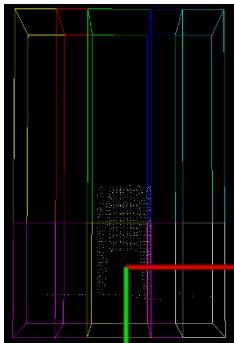

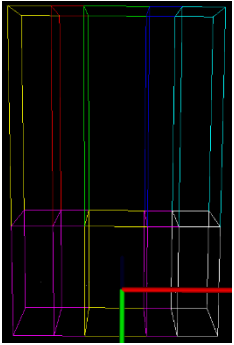
PRUEBA N° 4		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.30	0.30
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.40	1.40
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 0.93	0 a 0.93
Tiempo de respuesta en segundos	1.28	1.59
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Obstáculo total	Obstáculo total
Asertividad de respuesta	0 %	0%

TABLA 22

Prueba N°5: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 5		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.30	0.30
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.60	1.60
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 1.02	0 a 1.02
Tiempo de respuesta en segundos	1.30	1.65
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Obstáculo total	Obstáculo total
Asertividad de respuesta	0 %	0%

B. Análisis de las pruebas realizadas con la cámara a 0.30 m del suelo

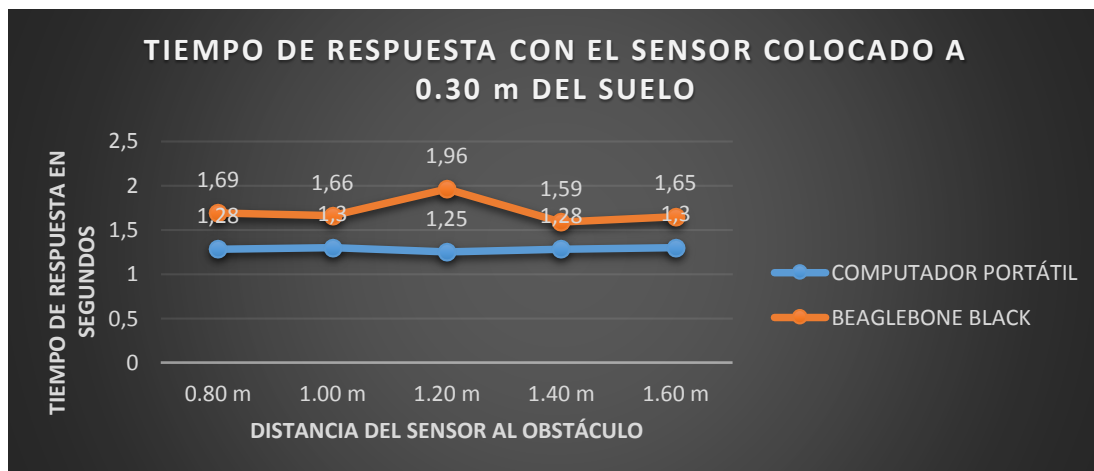


Figura 88 Tiempo de respuesta con el sensor colocado a 0.30 m del suelo

De los resultados presentados en las pruebas 16-20 se determina que 0.30 m es una altura muy reducida para la colocación del dispositivo ya que no se tiene una vista superior de 1.02 m en el eje Y (altura) y se pierde visualización de posibles obstáculos presentes a una altura superior a este valor.

La respuesta de selección del camino siempre produce el resultado “OBSTÁCULO TOTAL”, lo que indica que no hay paso para circular y es una respuesta errónea generada debido al rango de visión de la cámara y los parámetros definidos para el funcionamiento del dispositivo.

Bajo estas consideraciones, como se muestra en la figura 88 el tiempo promedio de respuesta en la computadora portátil es de 1.28 segundos, mientras que en la tarjeta BeagleBone Black es de 1.71 segundos, existiendo una diferencia de 0.43 segundos entre ambos dispositivos y que indica la desventaja de uso de una tarjeta.

C. Pruebas realizadas con el sensor a 0.60 m del suelo

Las pruebas 6-10 corresponden a una altura del sensor de 0.60 m a partir del suelo y se tomaron con cinco valores distintos de distancia entre el obstáculo y el sensor (0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.40 m, 1.60 m) respectivamente.

TABLA 23

Prueba N°6: Prueba de funcionamiento del dispositivo


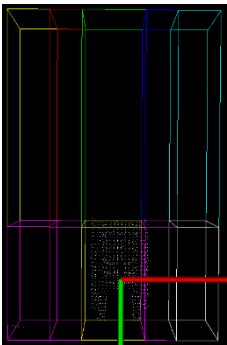
PRUEBA N° 6		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.60	0.60
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	0.80	0.80
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.31 a 0.92	0.31 a 0.92
Tiempo de respuesta en segundos	1.33	1.64
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 24

Prueba N°7: Prueba de funcionamiento del dispositivo


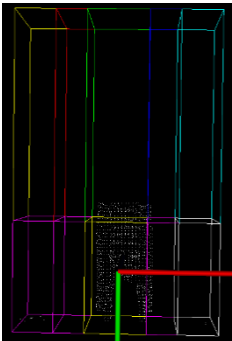
PRUEBA N° 7		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.60	0.60
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.00	1.00
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.82	1.82
Rango de visión en el eje "Y"	0.24 a 1.02	0.24 a 1.02
Tiempo de respuesta en segundos	1.25	1.78
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 25

Prueba N°8: Prueba de funcionamiento del dispositivo


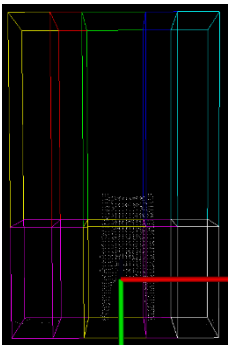
PRUEBA N° 8		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.60	0.60
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.20	1.20
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.16 a 1.05	0.16 a 1.05
Tiempo de respuesta en segundos	1.28	1.63
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 26

Prueba N°9: Prueba de funcionamiento del dispositivo


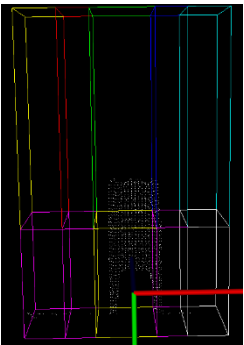

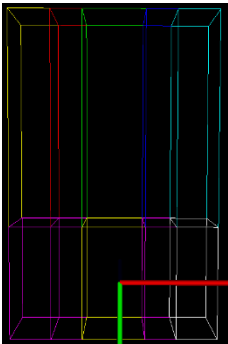
PRUEBA N° 9		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.60	0.60
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.40	1.40
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.05 a 1.19	0.05 a 1.19
Tiempo de respuesta en segundos	1.23	1.68
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso Izquierda	Paso Izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 27

Prueba N°10: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 10		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.60	0.60
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.62	1.62
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0 a 1.28	0 a 1.28
Tiempo de respuesta en segundos	1.22	1.78
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Camino libre	Camino libre
Asertividad de respuesta	100 %	100%

D. Análisis de las pruebas realizadas con el sensor a 0.30 m del suelo

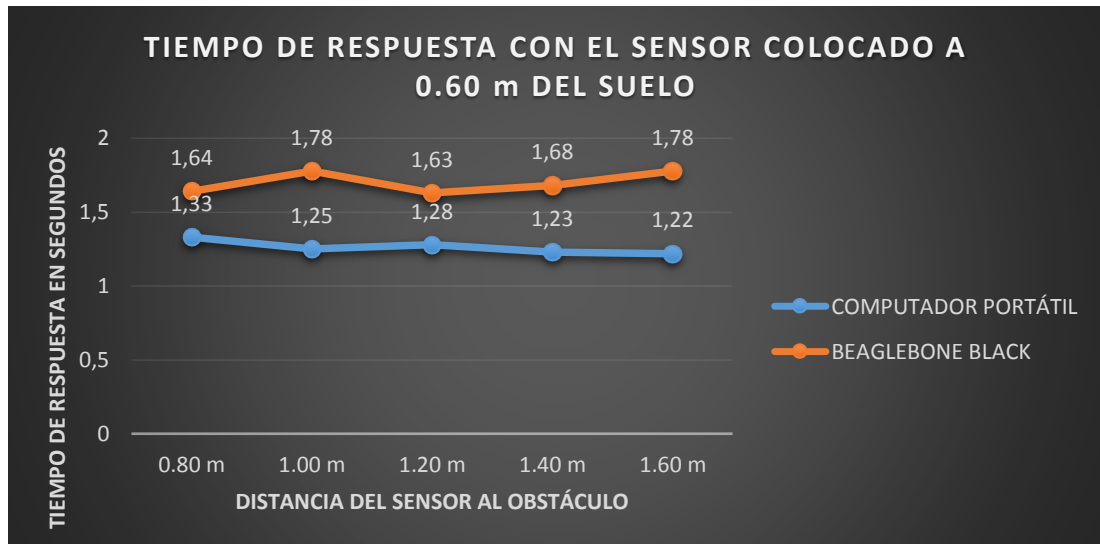


Figura 89 Tiempo de respuesta con el sensor colocado a 0.60 m del suelo

De los resultados presentados en las pruebas 16-20 se determina que 0.60 m es una altura idónea para la colocación del dispositivo ya que se tiene una vista superior de 1.78 m en el eje Y (altura) y no se pierde visualización de posibles obstáculos a esta altura. Si bien en las pruebas 6,7,8,9 se pierde visión del obstáculo desde 0.05 m hasta 0.31 m desde el piso, a partir de 1.60 m (prueba 10) ya se tiene una vista completa de 0 a 1.78 m de altura, cumpliendo de esta manera con los requerimientos de funcionamiento.

La respuesta de selección del camino producida es “PASO IZQUIERDA” para los cuatro primeros casos (tablas 23-26), lo cual es una respuesta acertada, y en la prueba N°10 (tabla 27) muestra una respuesta de “CAMINO LIBRE”, que resulta acertada ya que el obstáculo está fuera del rango de detección y a esa distancia aun no es detectado, de esto se deduce que el rango de visión más adecuado se alcanza bajo estos parámetros.

Bajo estas consideraciones como se muestra en la figura 89 el tiempo promedio de respuesta en la computadora portátil es de 1.262 segundos, mientras que en la tarjeta BeagleBone Black es de 1.702 segundos, existiendo una diferencia de 0.44 segundos entre ambos dispositivos.

E. Pruebas realizadas con el sensor a 0.90 m del suelo

Las pruebas 11-15 corresponden a una altura del sensor de 0.90 m a partir del suelo y se tomaron con cinco valores distintos de distancia entre el obstáculo y el sensor (0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.40 m, 1.60 m) respectivamente.

TABLA 28

Prueba N°11: Prueba de funcionamiento del dispositivo

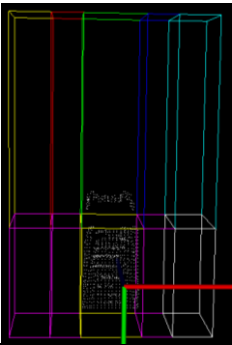
PRUEBA N° 11		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.90	0.90
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	0.80	0.80
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.58 a 1.20	0.58 a 1.20
Tiempo de respuesta en segundos	1.28	1.75
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso derecha	Paso derecha
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 29

Prueba N°12: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 12		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.90	0.90
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.00	1.00
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.48 a 1.28	0.48 a 1.28
Tiempo de respuesta en segundos	1.22	1.63
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso derecha	Paso derecha
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 30

Prueba N°13: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 13		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.90	0.90
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.20	1.20
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.38 a 1.30	0.38 a 1.30
Tiempo de respuesta en segundos	1.31	1.71
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso derecha	Paso derecha
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 31

Prueba N°14: Prueba de funcionamiento del dispositivo



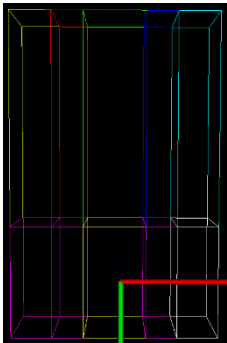
PRUEBA N° 14		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.90	0.90
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.40	1.40
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.27 a 1.43	0.27 a 1.43
Tiempo de respuesta en segundos	1.26	1.74
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso derecha	Paso derecha
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 32

Prueba N°15: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 15		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	0.90	0.90
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.60	1.60
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.18 a 1.50	0.18 a 1.50
Tiempo de respuesta en segundos	1.31	1.65
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso libre	Paso libre
Asertividad de respuesta	100 %	100%

F. Análisis de las pruebas realizadas con el sensor a 0.90 m del suelo

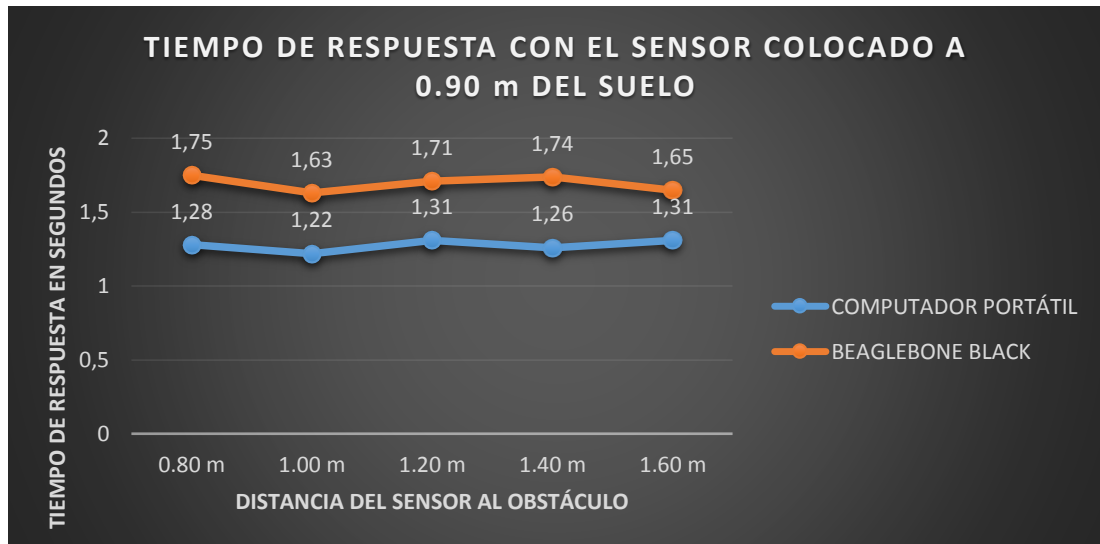


Figura 90 Tiempo de respuesta con el sensor colocado a 0.90 m del suelo

De los resultados presentados en las pruebas 16-20 se determina que 0.90 m es una altura no idónea para la colocación del dispositivo ya que se tiene una vista superior máxima de 1.50 m en el eje Y (altura) y se pierde visualización de posibles obstáculos a una altura superior a este valor, además en todas las pruebas realizadas bajo estas condiciones se pierde visualización de los obstáculos desde 0.18 m hasta 0.58 m desde el suelo lo cual incrementa el riesgo de no detectar un obstáculo dentro de este rango no visible impidiendo cumplir con los requerimientos de funcionamiento.

La respuesta de selección del camino producida es “PASO DERECHA” para los cuatro primeros casos lo cual es una respuesta acertada, y en la tabla 15 una respuesta de “CAMINO LIBRE”, que resulta también confiable ya que el obstáculo está por pocos centímetros fuera del rango de análisis y a esa distancia aún no es detectado.

Bajo estas consideraciones en la figura 90 el tiempo promedio de respuesta en la computadora portátil es de 1.276 segundos, mientras que en la tarjeta BeagleBone Black es de 1.696 segundos, existiendo una diferencia de 0.42 segundos entre ambos dispositivos.

G. Pruebas realizadas con el sensor a 1.20 m del suelo

Las pruebas 16-20 corresponden a una altura del sensor de 1.20 m a partir del suelo y se tomaron con cinco valores distintos de distancia entre el obstáculo y el sensor (0.80 m, 1.00 m, 1.20 m, 1.40 m, 1.60 m) respectivamente.

TABLA 33 Prueba N°16: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 16		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	1.20	1.20
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	0.80	0.80
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.86 a 1.45	0.86 a 1.45
Tiempo de respuesta en segundos	1.19	1.76
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 34

Prueba N°17: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 17		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	1.20	1.20
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.00	1.00
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.77 a 1.56	0.77 a 1.56
Tiempo de respuesta en segundos	1.23	1.60
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 35

Prueba N°18: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 18		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	1.20	1.20
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.20	1.20
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.70 a 1.60	0.70 a 1.60
Tiempo de respuesta en segundos	1.28	1.74
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 36

Prueba N°19: Prueba de funcionamiento del dispositivo

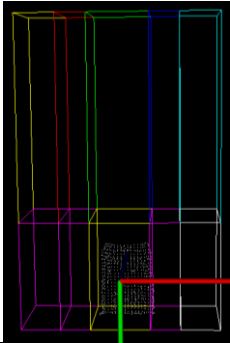
PRUEBA N° 19		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	1.20	1.20
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.40	1.40
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.61 a 1.72	0.61 a 1.72
Tiempo de respuesta en segundos	1.25	1.73
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

TABLA 37

Prueba N°20: Prueba de funcionamiento del dispositivo

PRUEBA N° 20		
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO		
IMAGEN 2D DEL ESCENARIO	POINT CLOUD DEL ESCENARIO	
		
ESPECIFICACIONES	COMPUTADOR PORTÁTIL	BEAGLEBONE BLACK
Ambiente en que se realiza la prueba	Interior	Interior
Altura de la cámara Asus Xtion Pro Live desde el suelo, en metros	1.20	1.20
Distancia de la cámara Asus Xtion Pro Live al obstáculo, en metros	1.60	1.60
Material del obstáculo	Plástico	Plástico
Tamaño Completo del obstáculo detectado en metros	1.65	1.65
Rango de visión en el eje "Y"	0.56 a 1.78	0.56 a 1.78
Tiempo de respuesta en segundos	1.29	1.64
Objeto detectado	Si	Si
Respuesta del algoritmo	Paso izquierda	Paso izquierda
Asertividad de respuesta	100 %	100%

H. Análisis de las pruebas realizadas con el sensor a 1.20 m del suelo.

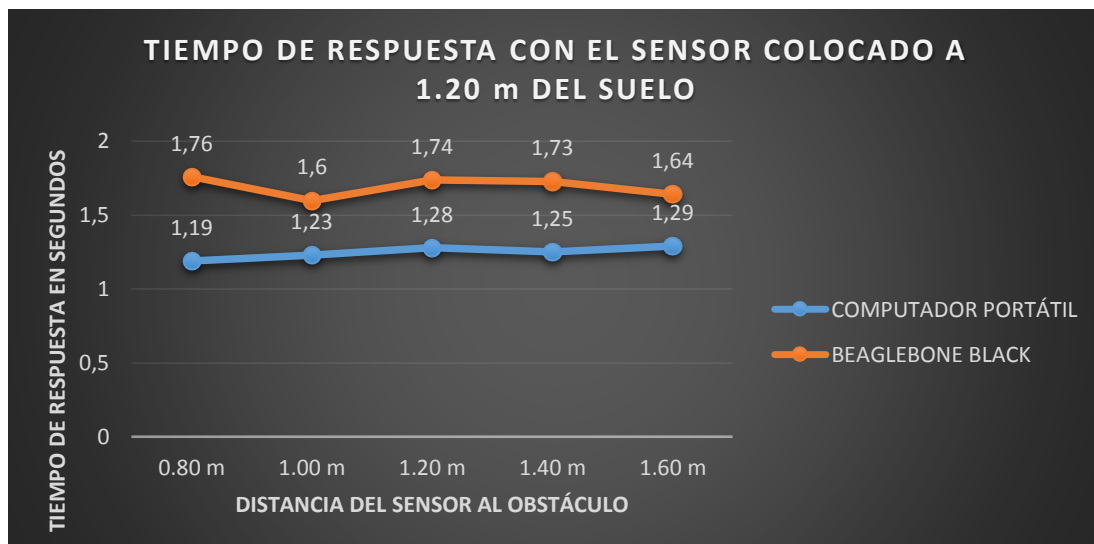


Figura 91 Tiempo de respuesta con el sensor colocado a 1.20 m del suelo

De los resultados presentados en las pruebas 16-20 se determina que 1.20 m es una altura no idónea para la colocación del dispositivo ya que pese a que se tiene una vista superior máxima de 1.78 m en el eje Y (altura) y se cumple con uno de los requerimientos del dispositivo, en todas las pruebas realizadas bajo estas condiciones se pierde visión de 0.566 m hasta 0.86 m desde el suelo lo cual incrementa el riesgo de no detectar un obstáculo dentro de este rango no visible impidiendo cumplir con los requerimientos de funcionamiento.

La respuesta de selección del camino producida es “PASO IZQUIERDA” para todos los casos lo cual es una respuesta acertada, a diferencia de las pruebas a 0.60 m y 0.90 m, en la prueba 20 se produjo “CAMINO LIBRE”, ya que en este caso una variación mínima en la colocación del obstáculo hace que no esté dentro del rango de análisis y a esa distancia no es detectado.

Bajo estas consideraciones como se muestra en la figura 91 el tiempo promedio de respuesta en la computadora portátil es de 1.248 segundos, mientras que en la tarjeta BeagleBone Black es de 1.694 segundos, existiendo una diferencia de 0.446 segundos entre ambos dispositivos.

3.1.6. Pruebas con personas no videntes.

Las pruebas detalladas en esta sección fueron realizadas con la ayuda de cuatro personas no videntes, cuyos datos e información se hallan detalladas en el anexo B, se tuvo en consideración una persona con discapacidad visual del 60% y tres personas con discapacidad visual del 100%. A cada uno de los sujetos de prueba se les realizó tres pruebas distintas cada una con variación tanto del número de obstáculos como de la posición de los mismos a nivel del suelo y elevados, en una trayectoria de 15 m aproximadamente. La prueba se realizó con el dispositivo ubicado como un cinturón al nivel de la cintura de cada uno de los usuarios, y se determinó la cantidad y porcentaje de obstáculos detectados y no detectados para cada prueba detallada en la tabla 38.

TABLA 38

Pruebas del dispositivo con personas con discapacidad visual

PRUEBAS DEL DISPOSITIVO CON PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL					
DETALLES	Ambiente: Interior Fecha de realización: 14 / 07 / 2016 Cantidad de obstáculos: 9 Material de los obstáculos: cartón Distancia recorrida: 15 m				
NOMBRES	OBSTÁCULOS DETECTADOS	OBSTÁCULOS DETECTADOS (%)	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS (%)	TIEMPO DE DURACIÓN DEL RECORRIDO (S)
Molina William	6	66,66%	3	33,34%	59
Chicaiza Néstor	4	44,44%	5	55,56%	58
Jácome Segundo	5	55,55%	4	44,45%	57
López Rita	7	77,77%	2	22,23%	64

CONTINÚA 

<p>PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS DETECTADOS</p>		<p>PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS NO DETECTADOS</p>			
DETALLES		Ambiente: Interior Fecha de realización: 14 / 07 / 2016 Cantidad de obstáculos: 11 Material de los obstáculos: cartón Distancia recorrida: 15 m			
NOMBRES	OBSTÁCULOS DETECTADOS	OBSTÁCULOS DETECTADOS (%)	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS (%)	TIEMPO DE DURACIÓN DEL RECORRIDO (S)
Molina William	8	72,72%	3	27,28%	60
Chicaiza Néstor	7	63,63%	4	36,37%	65
Jácome Segundo	7	63,63%	4	36,34%	68
López Rita	10	90,90%	1	9,10%	59
<p>PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS DETECTADOS</p>		<p>PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS NO DETECTADOS</p>			
DETALLES		Ambiente: Interior Fecha de realización: 14 / 07 / 2016 Cantidad de obstáculos: 13 Material de los obstáculos: cartón Distancia recorrida: 15 m			

NOMBRES	OBSTÁCULOS DETECTADOS	OBSTÁCULOS DETECTADOS (%)	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS	OBSTÁCULOS NO DETECTADOS (%)	TIEMPO DE DURACIÓN DEL RECORRIDO (S)
Molina William	9	69,23%	4	30,77%	62
Chicaiza Néstor	10	76,22%	3	23,08%	69
Jácome Segundo	11	84,61%	2	15,39%	63
López Rita	11	84,61%	2	15,39%	58

PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS DETECTADOS

Nombres	Porcentaje
Molina William	69,23%
Chicaiza Néstor	76,22%
Jácome...	84,61%
López Rita	84,61%

PORCENTAJE DE OBSTÁCULOS NO DETECTADOS

Nombres	Porcentaje
Molina William	30,77%
Chicaiza Néstor	23,08%
Jácome...	15,39%
López Rita	15,39%

- Pruebas con nueve obstáculos

Con base en los datos mostrados en la tabla 38, se tiene que de un total de 36 obstáculos colocados, 22 de ellos fueron detectados de forma exitosa lo cual corresponde al 61,11%, mientras 14 de ellos, es decir 38,89%, no fueron percibidos por el dispositivo o dieron una salida errónea por diversos factores como variaciones de la posición de la cámara al caminar u obstrucción de la visión de la misma por el cruce del bastón del usuario. Los resultados obtenidos se consideran no aceptables para el dispositivo, sin embargo, se debe tener en consideración que ésta fue la primera prueba que se llevó a cabo con cada participante y el dispositivo requiere de un entrenamiento previo para adaptación a su funcionamiento.

- Pruebas con once obstáculos

Con base en los datos mostrados en la tabla 38, se tiene que, de un total de 44 obstáculos colocados, 32 de ellos fueron detectados de forma exitosa lo cual corresponde al 72,72%, mientras 12 de ellos, es decir 27,28%, no fueron percibidos por el dispositivo o dieron una salida errónea por diversos factores como variaciones de la posición de la cámara al caminar u obstrucción de la visión de la misma por el cruce del bastón del usuario. Los resultados obtenidos se consideran aceptables para el dispositivo, y se nota mejoría respecto al primer grupo de pruebas con 9 obstáculos ya que los participantes mejoraban su adaptación al dispositivo.

- Pruebas con trece obstáculos

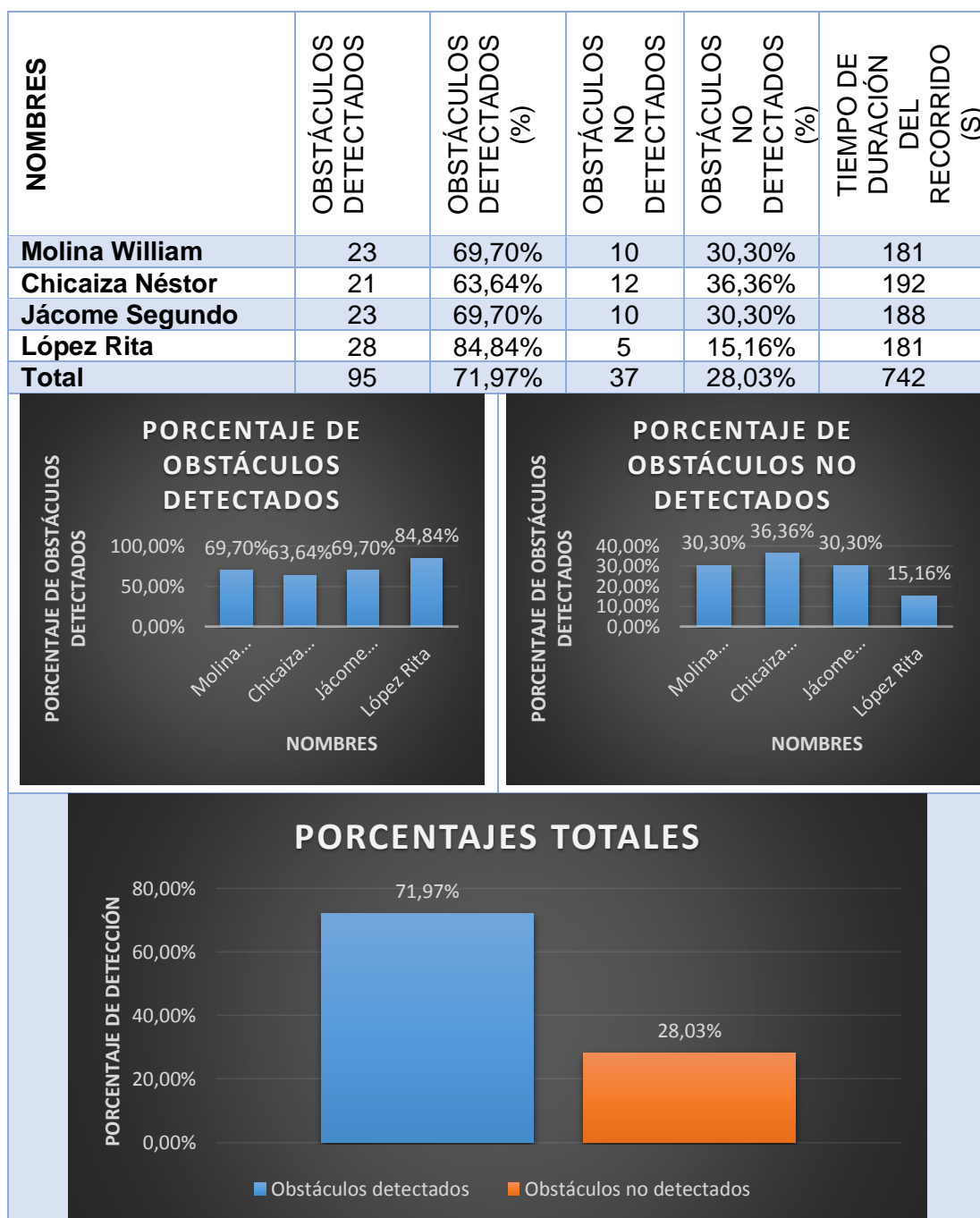
Con base en los datos mostrados en la tabla 38, se tiene que, de un total de 52 obstáculos colocados, 41 de ellos fueron detectados de forma exitosa lo cual corresponde al 78,85%, mientras 11 de ellos, es decir 21,15%, no fueron percibidos por el dispositivo o dieron una salida errónea por diversos factores ya antes mencionados. Los resultados obtenidos se consideran aceptables para el dispositivo, y se nota mejoría respecto al primer y segundo grupo de pruebas con 9 y 11 obstáculos respectivamente.

TABLA 39

Resultados generales de pruebas del dispositivo con personas con discapacidad visual

RESULTADOS GENERALES DE PRUEBAS DEL DISPOSITIVO CON PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL	
DETALLES	Ambiente: Interior Fecha de realización: 14 / 07 / 2016 Cantidad total de obstáculos: 132 Material de los obstáculos: cartón Distancia recorrida: 180 m

CONTINÚA 



De las pruebas realizadas con 9, 11, 13 obstáculos se obtienen los siguientes resultados generales (tabla 39), se tiene como resultado que de los 132 obstáculos colocados, 95 de ellos fueron detectados de forma exitosa lo cual corresponde al 71,97%, mientras 37 de ellos, es decir 28,03%, no fueron percibidos por el dispositivo.

3.2. Comprobación de la hipótesis

3.2.1. Hipótesis

¿El diseño e implementación de un dispositivo de apoyo para personas no videntes usando el sensor de movimiento ASUS XTION PRO LIVE y tecnología BEAGLEBONE BLACK bajo software libre ayudará a mejorar la movilidad de dichas personas y reducirá el riesgo de accidentes?

3.2.2. Prueba de proporciones de una muestra

El objetivo de la prueba de proporciones de una muestra es evaluar la validez de la hipótesis planteada inicialmente en el proyecto con respecto a la proporción de una población, utilizando una prueba de una muestra.

La metodología de prueba considera un número de observaciones de la muestra pequeño, de este modo, los valores estadísticos de prueba miden la desviación del valor estadístico de la muestra a partir de un valor propuesto y se basa en la distribución normal estándar para valores críticos. Quizá la única diferencia real entre las ambas radica en la forma como se obtiene la desviación estándar de la distribución de muestreo.

Esta prueba comprende el cálculo del valor estadístico de prueba Z, mismo que será calculado en base a los datos obtenidos en la tabla 40.

$$Z_{prueba} = \frac{\frac{x}{n} - p_o}{\sqrt{\frac{p_o(1-p_o)}{n}}} \quad (4)$$

Donde:

α = nivel de significancia

x = ocurrencias

n = observaciones

x/n = proporción de la muestra

p_o = proporción propuesta

Tabla 40

Pruebas con personas con discapacidad visual

PRUEBAS CON PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL				
Nombres	Obstáculos detectados	Obstáculos detectados (%)	Obstáculos no detectados	Obstáculos no detectados (%)
Molina William	9	69,23%	4	30,77%
Chicaiza Néstor	10	76,22%	3	23,08%
Jácome Segundo	11	84,61%	2	15,39%
López Rita	11	84,61%	2	15,39%
TOTAL	41	78,85%	11	21,15%

3.3.3. Cálculo del valor estadístico de prueba Z

Para el cálculo de del valor estadístico de prueba, se tienen en cuenta los siguientes valores:

$$x = 41$$

$$n = 52$$

$$x/n = 41/52$$

$$p_0 = \frac{8}{10} = 0.8$$

$$Z_{prueba} = \frac{\frac{41}{52} - 0.8}{\sqrt{\frac{0.8(1-0.8)}{52}}}$$

$$Z_{prueba} = \frac{-0.011538}{0.5547}$$

$$Z_{prueba} = -0.0208$$

3.3.4. Cálculo de la desviación estándar de la proporción

$$\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}} = \text{desviación estándar de la proporción} \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{0.8(1-0.8)}{52}} = \text{desviación estándar de la proporción}$$

$$\sqrt{\frac{0.8(1-0.8)}{52}} = \text{desviación estándar de la proporción}$$

$$0.05547 = \text{desviación estándar de la proporción}$$

Para calcular la hipótesis se considera un valor de significancia del 5%.

$$\alpha = 0.05$$

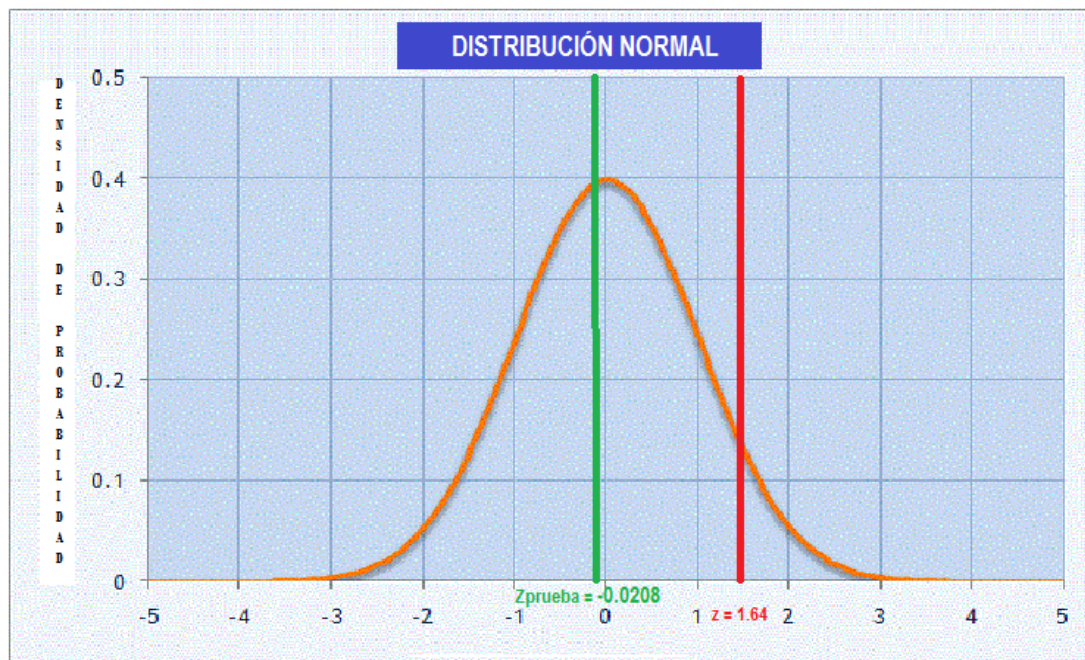


Figura 92 Distribución normal

Tabla 41 Tabla Z

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

La hipótesis es aceptada ya que Z de prueba = - 0.0208 es menor que $Z = 1.64$ de la tabla, por lo tanto el valor calculado de z se encuentra en la región de aceptación, por lo que la hipótesis es aceptada en el nivel 0.05 por lo que el sistema desarrollado apoya (lo que dice la hipótesis).

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El algoritmo desarrollado para la detección de obstáculos cumple con los requerimientos del dispositivo ya que identifica correctamente la presencia tanto de obstáculos a nivel del suelo y obstáculos levados como rótulos, cada uno de ellos en las diferentes áreas como son parte central, parte derecha y parte izquierda del camino, dando una salida confiable del posible camino a tomar en caso de presencia de obstáculos.

El sensor Asus Xtion Pro Live proporciona imágenes bastante fiables en tres dimensiones del ambiente capturado, siempre y cuando su ambiente de trabajo sea bajo ciertas condiciones como bajo nivel de luz solar que afecta directamente a la recepción de la imagen, por falta de reflexión de la malla de puntos infrarrojos; mientras que para trabajar en ambientes con una cantidad nula o muy baja de luz, el dispositivo presenta una salida muy confiable, las imágenes adquiridas en la oscuridad detectan los obstáculos presentes en el ambiente con gran precisión.

Asus Xtion Pro Live adquiere imágenes de los objetos sin importar la forma del mismo, pudiendo ser cuadrados, circulares, elípticos, triangulares o amorfos, sin embargo, si se ve afectado por el tamaño del mismo ya que si su altura es inferior a los 5 cm su detección no es fiable.

La captura de imágenes y la detección de obstáculos dentro de ellas es fiable para objetos de casi cualquier material, como madera, plástico, cemento, piedra, metal no reflectante, objetos de carácter vegetal, cuero, cartón, cerámica, etc. sin embargo para materiales reflectantes, de vidrio o transparentes la detección es muy imprecisa o casi nula obteniendo errores en las salidas de decisión del algoritmo.

El espesor de los objetos a detectar no influye en gran medida, ya que son detectados de forma fiable desde 1 cm de espesor en adelante, siempre y cuando se encuentren en el área de detección del sensor y su material corresponda a los señalados como detectables en el punto anterior.

Los objetos son detectados independientemente de la profundidad o distancia a la que se hallan los objetos, manteniendo mayor fiabilidad a partir de una distancia superior a 0.80 m y menor a los 3.5 m que es el rango de operación de la cámara Asus Xtion Pro Live.

Las secciones en las que se dividió la imagen para su análisis están en base a las dimensiones estimadas de una persona promedio 1.10 m aproximadamente y el área aproximada que ésta requeriría para su desplazamiento, que en este caso es de 0.6 m

La detección de obstáculos está basada en la identificación de puntos dentro de las secciones de análisis que representan un impedimento para la circulación libre por dicha área, más no en la identificación de objetos específicos de forma individual.

La salida de respuesta del dispositivo se considera lenta ya que le toma un promedio de 1.7 s el procesar la imagen y emitir una salida debido a las características propias de la tarjeta BeagleBone Black, como el tamaño de la memoria RAM, sin embargo, éste tiempo está dentro del considerado como aceptable para que la persona pueda asimilar la instrucción dada.

El procesamiento de imágenes se desarrolló con Point Cloud Library, por ser un software libre que da la posibilidad de aprovechar la capacidad del sensor de adquirir imágenes en 3 dimensiones de los ambientes, además de librerías, clases, métodos y funciones precargadas que facilitan el análisis de dichas imágenes, además de una visualización realista del ambiente.

La captura de imágenes requiere ser realizada bajo la menor variación de posicionamiento del sensor para mayor fiabilidad, pudiendo producirse salidas falsas por presencia de obstáculos inexistentes generados por la variación del mismo.

La altura a la que se coloca el dispositivo de captura de imágenes influye directamente a la respuesta que el dispositivo presenta, y se debe tener en cuenta que la respuesta más acertada se logra a una altura de 0.60 m siempre y cuando no existan variaciones bruscas del mismo y el ambiente cumpla con las condiciones de luz adecuadas.

Asus Xtion Pro Live presenta ciertas limitaciones de funcionamiento bajo determinadas condiciones ambientales no controlables como la presencia directa de luz solar, que impide la reflexión de la malla de rayos infrarrojos y por ende la detección de los obstáculos, sin embargo, hay que tener presente que mientras menor sea la cantidad de luz (artificial o solar) mejor es la respuesta del obtenida.

Point Cloud Library se convierte en una opción idónea para el procesamiento de imágenes en 3D adquiridas con sensores infrarrojos como Asus Xtion Pro Live y Kinect, que provienen de la misma familia, ya que permite aprovechar al máximo los datos obtenidos en cada nube de puntos y manipular esta información de forma fácil y didáctica.

4.2. Recomendaciones

El sensor Asus debe mantenerse a una altura aproximada de 0.60 m a nivel del suelo, en lo posible bajo condiciones de luz no excesivas, y considerando los rangos de funcionamiento propios especificados para asegurar su adecuado funcionamiento y una respuesta correcta del algoritmo.

Para que la salida del algoritmo sea confiable se deben evitarse movimientos bruscos del sensor ya que este está desarrollado para condiciones rangos específicos de análisis.

El dispositivo no debe aplicarse para detección de objetos como vidrio o plásticos transparentes que lo semejan, ya que el vidrio puede ser atravesado fácilmente por la luz infrarroja (radiación térmica). El cristal normal sólo puede reflejar los rayos ultravioletas, mientras que la radiación térmica puede atravesarlo sin apenas obstáculos.

La configuración de Channel Audio es imprescindible para el adecuado funcionamiento del dispositivo, además los tiempos de retardo de la salida de audio afectan directamente al tiempo de respuesta del sistema.

Considerar este proyecto como base para el desarrollo de otros proyectos de carácter similar basados en visión artificial como robots dentro de ambientes controlados pudiendo ser usados para evasión de obstáculos o detección de objetos específicos.

BeagleBone Black presenta limitaciones para la conexión de varios dispositivos de USB, lo que imposibilita su uso para determinadas aplicaciones, se recomienda emplear una versión más avanzada como BeagleBoard XM en futuros trabajos de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allison, D. (12 de Febrero de 2016). *adafruit*. Obtenido de http://www.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf
- Alvarez, M. A. (12 de Febrero de 2016). *desarrolloweb.com*. Obtenido de <http://www.desarrolloweb.com/articulos/cloud9-ide-desarrollo-online.html>
- Asus. (22 de Febrero de 2016). Obtenido de https://www.asus.com/es/3D-Sensor/Xtion_PRO_LIVE/overview/
- beagleboard.org*. (12 de Febrero de 2016). Obtenido de <https://beagleboard.org/black>
- COMPUTACIÓN E INFORMÁTICA*. (18 de Febrero de 2016). Obtenido de <http://epacomputacion.blogspot.com/2011/01/que-es-linux.html>
- Gellert, W., Gottwald, S., Hellwich, M., Kästner, H., & and Künstner, H. (1989). Deriving Triangle Plane Equations. *VNR Concise Encyclopedia of Mathematics, 2nd ed.* , 539-543.
- Giometti, R. (2015). *BeagleBone Essentials*. En R. Giometti. United Kingdom: Pack Publishing.
- Grupo de Robótica*. (18 de Febrero de 2016). Obtenido de http://robotica.unileon.es/mediawiki/index.php/PCL/OpenNI_tutorial_1:_Installing_and_testing
- Librosweb*. (22 de Febrero de 2016). Obtenido de http://librosweb.es/libro/javascript/capitulo_1.html
- Nina, G. (12 de Febrero de 2016). *enbolivia.com*. Obtenido de <https://enboliviacom.wordpress.com/2013/02/19/cloud9-ide-para-desarrollo-colaborativo/>
- PCL*. (12 de Marzo de 2016). Obtenido de <http://pointclouds.org/>
- PuTTY*. (16 de Febrero de 2016). Obtenido de <http://www.putty.org/>
- Salomón, R. R. (18 de Febrero de 2016). *Ciberaula*. Obtenido de http://linux.ciberaula.com/articulo/que_es_linux/
- WolframMathWorld*. (19 de Marzo de 2016). Obtenido de <http://mathworld.wolfram.com/HessianNormalForm.html>
- Woodfine, G. (22 de Febrero de 2016). *Geek.I.Am*. Obtenido de <http://garywoodfine.com/javascript-objects/>

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita **PATRICIA ALEJANDRA MAYORGA LÓPEZ** y el señor **DUSSAN ROMARIO DEFAZ CHANGO**.

En la ciudad de Latacunga, a los 03 días del mes de agosto del 2016.

Ing. Eddie Galarza.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Franklin Silva Monteros
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO