



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

“INTERACCIÓN DE UN ROBOT MINI-HUMANOIDE
TELEOPERADO COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA
TERAPIA DE LENGUAJE EN NIÑOS DEL HOSPITAL PROVINCIAL
GENERAL DOCENTE RIOBAMBA”

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:
INGENIERA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTORAS: MONCAYO VALLEJO KAREN JANINE
ESTRADA COLCHA KATHERINE GABRIELA
TUTOR: ING. EDWIN VINICIO ALTAMIRANO SANTILLÁN

Riobamba – Ecuador

2017

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: “INTERACCIÓN DE UN ROBOT MINI-HUMANOIDE TELEOPERADO COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA TERAPIA DE LENGUAJE EN NIÑOS DEL HOSPITAL PROVINCIAL GENERAL DOCENTE RIOBAMBA”, de responsabilidad de las señoritas MONCAYO VALLEJO KAREN JANINE y ESTRADA COLCHA KATHERINE GABRIELA, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

| NOMBRE | FIRMA | FECHA |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Ing. Washington Luna DECANO FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA | _____ | _____ |
| Ing. Freddy Chávez V. DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES. | _____ | _____ |
| Ing. Edwin Altamirano DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | _____ | _____ |
| Ing. José Guerra MIEMBRO DEL TRIBUNAL | _____ | _____ |

Nosotras, Karen Janine Moncayo Vallejo y Katherine Gabriela Estrada Colcha, declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales.

Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

Riobamba, 15 de marzo del 2017

Karen Janine Moncayo Vallejo
060351708-7

Katherine Gabriela Estrada Colcha
060357133-2

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a varias personas que son muy importantes en mi vida, pero sobre todo a mis padres Jorge Herman y María Raquel quienes han sido mi más grande apoyo, con amor, paciencia, ejemplo y consejos hacen que cada día sea una mejor persona, que persevera por lo que desea conseguir y que no se deja decaer por las adversidades. A mi hermano Jorge Steven desde niña ha sido mi ejemplo, ha estado en los momentos que más lo he necesitado y me regalo la felicidad más grande que es el amor de mis tres tesoros Jorgito Andrés, Jordito y Sofita.

A mí querida abuelita mamá Raquelita, más que abuelita ha sido una madre, me siento tan afortunada de tenerle junto a mí. Mis angelitos del cielo, abuelitos papá Bolito y mamá Michita, mis hermanitos Ángel Francisco y María Angélica que siempre me han guiado por el camino correcto y en mismo peores momentos me han dado la calma y sabiduría para seguir. A mi prima Anny que es como mi hermana, desde niñas siempre hemos estado juntas compartiendo cada instante importante en nuestras vidas.

Quiero agradecer y dedicar este trabajo a una persona muy especial para mí Fabián, gracias por estar a mi lado compartiendo tantos momentos entre buenos y malos, ha sido un gran apoyo y me ha enseñado a dar lo mejor de mí en cada cosa que decido hacer.

Cada una de estas personas son lo más valioso que tengo en mi vida y por las que daría todo, les amo con todo mi corazón y cada día agradezco a Dios por tenerles conmigo, este triunfo no es solo mío sino también de ustedes, cada uno ha depositado su confianza en mí y con cada granito de arena se ha llegado a cumplir este anhelado sueño.

Jani.

Lo que da sentido a la vida es la compañía de personas especiales que alegran el corazón, por eso quiero dedicar este trabajo de titulación a los pilares de mi vida, a mi Padre Carlos que siempre ha sido mi ejemplo en todo aspecto, que con sus consejos me ha guiado en cada paso y me ha llenado de seguridad y confianza en mí misma, a mi Madre Gladys por todo su amor y comprensión que con cada caricia y palabra de amor a sabido llenarme el corazón de paz y ganas de continuar, a mis hermanos Santiago, Johana y Estefy con quienes he compartido grandes alegrías y tristezas, quienes siempre me animan.

A una persona, que estuvo a mi lado en esta etapa de mi vida y supo brindarme siempre una palabra de aliento, que me impulsara y me diera seguridad para afrontar cualquier reto, que con su cariño me dio fortaleza y nunca me dejó sola.

A mis amigos que han sido las mejores personas que he encontrado en esta Institución, con quienes he compartido este largo camino lleno de alegrías y me han demostrado lo que es la verdadera amistad.

Este proyecto también es dedicado a una persona muy importante en mi vida que, aunque ahora no se encuentre a mi lado físicamente siempre la llevo conmigo en mi corazón, mi Abuelita Mami Rosi quien fue mi otra madre, un ejemplo de una mujer fuerte, amorosa y luchadora, la persona que con su presencia y su bendición me llenó de amor.

Gracias por cada enseñanza y la confianza que han depositado en mí, por ustedes soy lo que soy, los amo con todo mi corazón.

Gabby

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a Dios, quien nos ha guiado en cada paso que hemos dado durante el transcurso de esta etapa de nuestras vidas y que nos ha permitido alcanzar esta meta que nos propusimos.

A nuestras familias que con su infinito amor y comprensión han estado apoyándonos e impulsándonos en todo momento, por ser nuestra fortaleza y brindarnos una vida llena de aprendizajes y felicidad.

A todos los maestros de la Facultad de informática y Electrónica por brindarnos parte de sus conocimientos y por ser nuestros guías. Especialmente al Ingeniero Edwin Altamirano, Director del trabajo de Titulación y al Ingeniero José Guerra Miembro del Tribunal el ayuda brindado en todo momento durante la realización de este proyecto.

Jani. & Gabby

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------|--------------|
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTO | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | XII |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | XIII |
| ÍNDICE DE ABREVIATURAS | XIV |
| ÍNDICE DE ANEXOS | XVI |
| <i>RESUMEN</i> | <i>XVII</i> |
| <i>SUMMARY</i> | <i>XVIII</i> |
| <i>INTRODUCCIÓN</i> | <i>1</i> |

CAPÍTULO I

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | MARCO TEÓRICO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES..... | 3 |
| 1.1 | <i>INTRODUCCIÓN</i> | 3 |
| 1.2 | <i>DISCAPACIDAD</i> | 4 |
| 1.2.1 | <i>Discapacidad en Ecuador</i> | 4 |
| 1.2.2 | <i>Deficiencia de lenguaje</i> | 5 |
| 1.2.3 | <i>Terapia del Lenguaje</i> | 5 |
| 1.3 | <i>ROBÓTICA</i> | 6 |
| 1.3.1 | <i>Selección del robot mini-humanoide</i> | 6 |
| 1.4 | <i>TARJETA DE DESARROLLO PARA CONTROL</i> | 9 |
| 1.4.1 | <i>Selección de la Tarjeta de Desarrollo para el Control</i> | 9 |
| 1.5 | <i>SENSOR KINECT</i> | 11 |
| 1.5.1 | <i>Datos Técnicos</i> | 12 |
| 1.6 | <i>SISTEMA DE ALIMENTACIÓN</i> | 13 |
| 1.6.1 | <i>La batería</i> | 13 |
| 1.6.2 | <i>Selección del Sistema de Alimentación</i> | 14 |
| 1.7 | <i>SISTEMA DE COMUNICACIÓN</i> | 15 |
| 1.8 | <i>SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO</i> | 16 |

CAPÍTULO II

| | | |
|-----|-------------------------------------------------|----|
| 2 | DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO | 17 |
| 2.1 | <i>ARQUITECTURA HARDWARE DEL PROYECTO</i> | 19 |

| | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.1 | <i>Implementación del Robot para el proyecto.</i> | 20 |
| 2.2 | <i>ANÁLISIS MATEMÁTICO PARA LA CINEMÁTICA DE LAS EXTREMIDADES DEL ROBOT</i> | 23 |
| 2.2.1 | <i>Cinemática Inversa del Brazo</i> | 23 |
| 2.2.2 | <i>Cinemática Inversa de la Pierna</i> | 30 |
| 2.3 | <i>DESARROLLO DEL SOFTWARE</i> | 34 |
| 2.3.1 | <i>Desarrollo en el software LabVIEW.</i> | 35 |
| 2.3.1.1 | <i>ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW POR MEDIO DEL SENSOR KINECT</i> | 35 |
| 2.3.2 | <i>Inicialización, configuración y cierre de Kinect</i> | 37 |
| 2.3.3 | <i>Obtención de las coordenadas de cada articulación del esqueleto.</i> | 38 |
| 2.3.3.1 | <i>PROCESAMIENTO DE DATOS EN LABVIEW.</i> | 41 |
| 2.3.4 | <i>Transmisión de datos desde LabVIEW.</i> | 42 |
| 2.3.5 | <i>Desarrollo de la Interfaz Gráfica de Usuario.</i> | 43 |
| 2.3.6 | <i>DESARROLLO DE LOS PROCESOS EN EL SOFTWARE ARDUINO.</i> | 44 |
| 2.3.7 | <i>Recepción y procesamiento de datos en la placa controladora Arbotix-M.</i> | 45 |
| 2.3.8 | <i>Control de los servomotores AX-12 mediante ArbotiX-M Robocontroller.</i> | 45 |
| 2.3.9 | <i>Control del nivel de batería dentro de Arduino.</i> | 47 |

CAPÍTULO III

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3 | PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 48 |
| 3.1 | <i>INTRODUCCIÓN</i> | 48 |
| 3.2 | <i>CALIBRACIÓN DEL SENSOR KINECT.</i> | 48 |
| 3.3 | <i>MEDICIÓN DEL GRADO DE PRECISIÓN EN EL SERVOMOTOR DYNAMIXEL AX-12A</i> | 50 |
| 3.4 | <i>DIFERENCIA ÁNGULOS OBTENIDOS DEL USUARIO Y LOS CALCULADOS PARA EL ROBOT</i> | 52 |
| 3.5 | <i>MEDICIÓN DEL RANGO MÁXIMO DE DISTANCIA EN LA COMUNICACIÓN INALÁMBRICA</i> | 58 |
| 3.6 | <i>CONSUMO DE ENERGÍA DEL PROTOTIPO.</i> | 59 |
| 3.7 | <i>GRADO DE ACEPTACIÓN Y BENEFICIO DEL PROTOTIPO.</i> | 61 |

| | | |
|--|---------------------|----|
| | CONCLUSIONES | 65 |
|--|---------------------|----|

| | | |
|--|------------------------|----|
| | RECOMENDACIONES | 66 |
|--|------------------------|----|

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1: Tipo de discapacidad actual..... | 5 |
| Tabla 2-1: Comparación modelos de robots. | 7 |
| Tabla 3-1: Comparación Series Dynamixel. | 7 |
| Tabla 4-1: Comparación Tarjetas de Desarrollo para Servomotores Dynamixel. | 10 |
| Tabla 5-1: Especificaciones técnicas del Kinect. | 12 |
| Tabla 6-1: Especificaciones técnicas de las baterías. | 14 |
| | |
| Tabla 1-2: Distribución de los GDL del Robot..... | 20 |
| Tabla 2-2: Tabla de la matriz de los parámetros de Denavit Hartenberg del brazo. | 27 |
| Tabla 3-2: Herramientas de LabVIEW configuración Kinect..... | 37 |
| Tabla 4-2: Herramientas de LabVIEW obtención de coordenadas. | 39 |
| Tabla 5-2: Comandos para adquirir datos inalámbricamente en Arduino..... | 45 |
| Tabla 6-2: Rango máximo y mínimo para los servomotores AX-12. | 46 |
| Tabla 7-2: Comandos para configurar los servomotores AX-12 en Arduino. | 47 |
| Tabla 8-2: Comandos para medir el nivel de batería en Arduino. | 47 |
| | |
| Tabla 1-3: Distancia de ubicación del sensor vs visualización del usuario..... | 49 |
| Tabla 2-3: Pruebas ángulos deseados vs ángulos obtenidos en el servomotor. | 50 |
| Tabla 3-3: Resultados prueba de hipótesis grado de precisión del Servomotor..... | 51 |
| Tabla 4-3: Primera prueba extremidades superiores. | 52 |
| Tabla 5-3: Segunda prueba extremidades superiores. | 53 |
| Tabla 6-3: Tercera prueba extremidades superiores. | 53 |
| Tabla 7-3: Cuarta prueba extremidades superiores. | 53 |
| Tabla 8-3: Quinta prueba extremidades superiores..... | 54 |
| Tabla 9-3: Resultados prueba de hipótesis grado de similitud extremidades superiores. | 55 |
| Tabla 10-3: Primera prueba extremidades inferiores. | 56 |
| Tabla 11-3: Segunda prueba extremidades inferiores. | 56 |
| Tabla 12-3: Tercera prueba extremidades inferiores..... | 57 |
| Tabla 13-3: Resultados prueba de hipótesis grado de similitud extremidades inferiores. | 57 |
| Tabla 14-3: Distancia vs datos recibidos inalámbricamente. | 58 |
| Tabla 15-3: Consumo de potencia del prototipo a plena carga. | 59 |
| Tabla 16-3: Duración de la batería a plena carga..... | 60 |
| Tabla 17-3: Duración de la batería a plena carga..... | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1: Robot Androide. | 6 |
| Figura 2-1: Servomotor AX-12A. | 8 |
| Figura 3-1: Conexión Serial Servomotores Dynamixel. | 8 |
| Figura 4-1: Bioloid Premiun. | 9 |
| Figura 5-1: ArbotiX-M Robocontroller. | 10 |
| Figura 6-1: Conexión de la placa Arbotix-M al PC. | 11 |
| Figura 7-1: Arquitectura del Sensor Kinect. | 11 |
| Figura 8-1: Batería de Polímero de Litio (LiPo). | 14 |
| Figura 9-1: Módulo de comunicación inalámbrica Xbee. | 15 |
| | |
| Figura 1-2: Esquema para el desarrollo del proyecto. | 18 |
| Figura 2-2: Dispositivos del primer bloque. | 19 |
| Figura 3-2: Diagrama de conexión primer bloque. | 19 |
| Figura 4-2: Dispositivos del segundo bloque. | 20 |
| Figura 5-2: Diagrama de conexión del segundo bloque. | 21 |
| Figura 6-2: Modelamiento del soporte para la placa controladora. | 22 |
| Figura 7-2: Bioloid Premiun Tipo B implementado | 22 |
| Figura 8-2: Estructura física del brazo. | 24 |
| Figura 9-2: Estructura geométrica de las articulaciones del brazo. | 24 |
| Figura 10-2: Estructura geométrica de la articulación q2. | 25 |
| Figura 11-2: Estructura geométrica de la articulación q4, q6. | 25 |
| Figura 12-2: Matriz de Transformación Homogénea. | 27 |
| Figura 13-2: Diagrama de cuerpo libre, sistemas de referencia del brazo. | 27 |
| Figura 14-2: Matriz de Transformación Homogénea $i - \mathbf{1A}i$ | 28 |
| Figura 15-2: Matriz de Transformación Homogénea final del Brazo del robot. | 29 |
| Figura 16-2: Estructura física de la pierna. | 30 |
| Figura 17-2: Estructura geométrica de las articulaciones de la pierna. | 31 |
| Figura 18-2: Estructura geométrica de los ángulos parciales de la pierna. | 32 |
| Figura 19-2: Estructura física de la cadera. | 33 |
| Figura 20-2: Matriz de Rotación en el eje x. | 34 |
| Figura 21-2: Diagrama de flujo para procesamiento de datos. | 35 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22-2: Articulaciones captadas por el sensor Kinect..... | 36 |
| Figura 23-2: Funciones Toolkit Kinesthesia..... | 36 |
| Figura 24-2: Additional VIs Toolkit Kinesthesia..... | 36 |
| Figura 25-2: Configuración Dispositivo Kinect..... | 37 |
| Figura 26-2: Obtención de coordenadas de las extremidades superiores..... | 38 |
| Figura 27-2: Obtención de coordenadas de las extremidades inferiores..... | 39 |
| Figura 28-2: SubVIs de cada extremidad..... | 40 |
| Figura 29-2: Información compactada dentro de un SubVI..... | 40 |
| Figura 30-2: Procesamiento extremidades Superiores..... | 41 |
| Figura 31-2: Procesamiento extremidades Inferiores..... | 42 |
| Figura 32-2: Comunicación mediante paquete NI VISA..... | 42 |
| Figura 33-2: Interfaz Gráfica para el usuario en LabVIEW..... | 43 |
| Figura 34-2: Diagrama de flujo del procedimiento de Arduino..... | 44 |
| Figura 35-2: Selección placa Arbotix en Arduino..... | 45 |
| | |
| Figura 1-3: Interpretación del usuario por el sensor Kinect en función a la distancia..... | 49 |
| Figura 2-3: Prueba extremidades superiores robot vs teleoperador..... | 52 |
| Figura 3-3: Prueba extremidades inferiores robot vs teleoperador..... | 56 |
| Figura 4-3: Cadena de caracteres..... | 58 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|-----------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1-3: Respuesta en la primera pregunta..... | 62 |
| Gráfico 2-3: Respuesta en la segunda pregunta. | 62 |
| Gráfico 3-3: Respuesta en la tercera pregunta. | 63 |
| Gráfico 4-3: Respuesta en la cuarta pregunta..... | 63 |
| Gráfico 5-3: Respuesta en la quinta pregunta. | 64 |
| Gráfico 6-3: Respuesta en la sexta pregunta. | 64 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación 1-2: Ángulo movimiento vertical del hombro. (MG)..... | 25 |
| Ecuación 2-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función cos. (MG) | 26 |
| Ecuación 3-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función arctan. (MG)..... | 26 |
| Ecuación 4-2: Ángulo movimiento del codo. (MG) | 26 |
| Ecuación 5-2: Ecuación para encontrar la matriz de Transformación Homogénea. | 28 |
| Ecuación 6-2: Primer Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final..... | 29 |
| Ecuación 7-2: Segundo Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final..... | 29 |
| Ecuación 8-2: Tercer Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final. | 29 |
| Ecuación 9-2: Ángulo movimiento vertical del hombro. (DH)..... | 29 |
| Ecuación 10-2: Ángulo movimiento del codo. (DH) | 30 |
| Ecuación 11-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función cos. (DH) | 30 |
| Ecuación 12-2: Ángulo para el movimiento del muslo. (MG)..... | 32 |
| Ecuación 13-2: Ángulo para el movimiento de la rodilla. (MG) | 33 |
| Ecuación 14-2: Ángulo para el movimiento del tobillo. (MG) | 33 |
| Ecuación 15-2: Ángulo de cabeceo del tobillo. (MG) | 33 |
| Ecuación 16-2: Ángulo movimiento vertical de la cadera. (MG) | 33 |
| Ecuación 17-2: Ángulo movimiento vertical del hombro con rotación en x. (MG) | 34 |
| Ecuación 18-2: Transformación de grados a bits según la resolución del paso del servomotor. 46 | |
| Ecuación 19-2: Transformación de grados a bits según el cero del servomotor. | 46 |
| Ecuación 1-3: Establecimiento Hipótesis grado de precisión en el Servomotor..... | 50 |
| Ecuación 2-3: Establecimiento Hipótesis grado de similitud entre el teleoperador y el robot.... | 54 |
| Ecuación 3-3: Calculo rendimiento de la batería. | 59 |

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| °: | Grados |
| °C: | Grados Celsius |
| 3D: | 3 Dimensiones |
| A: | Amperios |
| BRA: | British Robot Association |
| CIF: | Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud |
| CMOS: | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor |
| CONADIS: | Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades |
| Cos: | Coseno |
| DH: | Denavit Hartenberg |
| Ecu: | Ecuación |
| fps: | Frames Per Second |
| g: | Gramos |
| GDL: | Grados de libertad de un robot |
| GHz: | Gigahertzio |
| h: | Hora |
| ID: | Identificador |
| ISO: | International Organization for Standardization |
| JIRA: | Japan Industrial Robot Association |
| kb: | Kilobit |
| kg: | Kilogramos |
| Led: | Light-Emitting Diode |
| Li-ion: | Iones de Litio |
| LiPo: | Polímero de Litio |
| m: | Metros |
| mA: | Miliamperios |
| Mb: | Megabit |
| MG: | Método Geométrico |
| MHz: | Megahertzio |
| mm: | Milímetros |
| Ni- Cd: | Níquel-Cadmio |

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| Ni-Mh: | Níquel-Hidruro Metálico |
| OMS: | Organización Mundial de la Salud |
| ONU: | Organización de las Naciones Unidas |
| PC: | Computador |
| RGB: | Red, Green, Blue |
| RIA: | Robotics Industries Association |
| rpm: | Revoluciones por minuto |
| RUR: | Rossum's Universal Robots |
| Sin: | Seno |
| Sist: | Sistema |
| SubVi: | Subrutina Instrumentos virtuales |
| Tan: | Tangente |
| Usb: | Universal Serial Bus |
| V: | Voltaje corriente directa |
| Vi: | Instrumentos Virtuales |
| Wh: | Vatio-Hora |

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Manual de usuario

Anexo B: Manual Robocontroller Arbotix-M

Anexo C: Manual Servomotores Dynamixel AX-12A

Anexo D: Datasheet módulo Xbee s1.

Anexo E: Pruebas de movimiento de las extremidades de robot vs las del teleopredador

Anexo F: Interacción del robot con los niños del Área de Terapia de Lenguaje.

Anexo G: Procedimiento para encontrar la cinemática inversa del robot.

Anexo H: Código del Programa en Arduino.

Anexo I: Licencia Estudiantil Original LabVIEW

Anexo J: Programación en LabVIEW

RESUMEN

Se implementó un robot mini-humanoide teleoperado como herramienta de apoyo para el personal del área de Terapia de Lenguaje del Hospital Provincial General Docente Riobamba. Este prototipo estuvo conformado por un sensor kinect que captó los movimientos del terapeuta los cuales fueron visualizados en el *software* LabVIEW junto con las coordenadas en las que se localizaron las extremidades del usuario. Estas coordenadas fueron procesadas mediante cinemática inversa para obtener los ángulos que adoptó el robot humanoide para representar los movimientos del usuario, el sistema trabajó con módulos Xbee para realizar la comunicación inalámbrica con la PC y la placa Arbotix-M, encargada de controlar los servomotores del robot. De las pruebas realizadas se comprobó que el sistema diseñado presentó un error de 0.05% con una similitud del 95% con respecto a los puntos en los que se encontraban las extremidades del teleoperador, con un retardo de 5 ms debido al procesamiento de datos que se realizó dentro del *software* que lo controla. Se comprobó que las extremidades inferiores restringen movimientos debido a la pérdida de estabilidad del robot por su naturaleza humanoide y que fueron controlados por el *software*. En las pruebas realizadas, el sistema implantado presenta una aceptación del 98% en los niños, lo consideran novedoso, atractivo y genera mayor atención en los procesos que se ejecutan durante las actividades de terapia. Se concluyó que los elementos empleados en este proyecto por depender de factores ambientales deben ser calibrados y estar a mediana luminosidad para garantizar que los resultados no difieran de lo esperado. Es recomendable incorporar el estudio del centro de gravedad del robot en proyectos futuros para lograr la mejor movilidad de las extremidades inferiores y que el grado de similitud en sus movimientos sea mayor.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <ROBÓTICA>, <XBEE> <SENSOR KINECT>, <ARBOTIX-M (SOFTWARE - HARDWARE)>, <SERVOMOTORES>, <ROBOT HUMANOIDE>, <LabVIEW>.

SUMMARY

A teleoperated mini-humanoid robot was implemented as a support tool for the staff of the Language Therapy area of the Provincial General Hospital of Riobamba. This prototype consisted of a Kinect sensor that captured the movements of the therapist which were visualized in the LabVIEW software along with the coordinates in which the user's limbs were located. These coordinates were processed by inverse kinematics to obtain the angles that the humanoid robot adopted to represent the user's movements, the system worked with Xbee modules to perform wireless communication with the PC and the Arbotix-M plate, it was in charge of controlling the servomotors of the robot. From the tests carried out, it was verified that the system designed presented an error of 0.05% with a similarity of 95% with respect to the points where the teleoperator's extremities were, with a delay of 5 ms due to the data processing that was made within the software that controls it. It was found that the lower limbs restrict movements due to the robot's loss of stability due to its humanoid nature and that were controlled by the software. In the tests performed, the implanted system shows a 98% acceptance in children, considering it novel, attractive and generating more attention in the processes that are executed during the therapy activities. It was concluded that the elements used in this project to be dependent on environmental factors should be calibrated and be in the mid-light to ensure that the results do not differ from what was expected. It is advisable to incorporate the study of the center of gravity of the robot in future projects to achieve the best mobility of the lower limbs and that the degree of similarity in its movements is greater.

KEYWORDS: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <ROBOTICS>, <XBEE>
<SENSOR KINECT>, <ARBOTIX-M (SOFTWARE-HARDWARE)>, <SERVOMOTERS>,
<ROBOT HUMANOIDE>, <LabVIEW>.

INTRODUCCIÓN

Conforme a los datos obtenidos por la Organización Mundial de la Salud en el año 2011, se estima que más de mil millones de habitantes entre niños y adultos viven con algún tipo de discapacidad, es decir un 15% de la población mundial. Alrededor de ochenta y cinco millones pertenecen a América Latina. Por este motivo se han creado diferentes proyectos tecnológicos a nivel mundial como apoyo dentro de las terapias a las que asisten estas personas. (CHAN, et al.)

Los avances en la robótica permitieron que la morfología del robot se adapte a cualquier entorno, ampliando los campos de aplicación en los que puede trabajar, uno de estos es el uso de robots como intermediarios entre niños y terapeutas para tratar deficiencias. Se demostró que el uso de estos dispositivos los motiva. (CASALS)

En el año de 2007 se desarrolló en Kioto, Japón un robot denominado “Keepon” controlado por un teleoperador que interactúa con niños en escuelas y centros para el tratamiento de problemas en comunicación social. (KOZIMA). En el año 2014 en España, la Unidad de Neuror Rehabilitación Infantil del Hospital de Manises inició a utilizar a “Coco”, un robot humanoide cedido por el Laboratorio de Robótica de la Universidad Jaume I de Castellón, como apoyo para fomentar la comunicación, el lenguaje, la interacción social y la conducta en niños con trastornos del espectro autista (ESMARCITY). Proyecto similar es “Teco” un robot creado por jóvenes mexicanos, que se centra en las expresiones faciales las cuales llaman la atención de los niños que buscan imitarlas (HERNÁNDEZ).

En Ecuador es muy poca la atención que se da al tratamiento de los niños con el uso de herramientas tecnológicas, un proyecto relacionado a este campo es “Willow”, un robot desarrollado en el año 2015 por un grupo de estudiantes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Desarrollado como un método terapéutico para facilitar la comunicación en niños con autismo y síndrome de Asperger, dispone en la parte frontal de un smartphone para su funcionamiento (MÁRQUEZ).

El presente trabajo de titulación propone el ingreso de un dispositivo tecnológico para el Hospital Provincial General Docente Riobamba, como herramienta de apoyo en el área de Terapia de Lenguaje para motivar la movilidad y la habilidad en el habla de los niños que acuden a sus terapias.

El prototipo implementado consta de un robot mini humanoide capaz de replicar los movimientos de las extremidades del teleoperador. El proyecto consta de dos partes: *hardware* y *software*. El

hardware está conformado por un sensor Kinect que capta las coordenadas en las que están situadas las articulaciones del operador, dos módulos Xbee para la comunicación inalámbrica entre la PC y la placa Arbotix M. La parte *software* es la encargada de realizar el procesamiento de los datos, controla los ángulos de las articulaciones del robot para simular los movimientos del teleoperador.

El objetivo general del trabajo de titulación es controlar la movilidad de las extremidades del robot mini-humanoide teleoperado como herramienta de apoyo para la interacción con niños de Terapia de Lenguaje del Hospital Provincial General docente Riobamba.

Los objetivos específicos planteados para el desarrollo e implantación del este proyecto son:

- Analizar y estudiar las características de los elementos y dispositivos más adecuados para la implementación del proyecto.
- Implementar un firmware para el control de los actuadores del robot-humanoide.
- Estudiar los datos obtenidos por el Kinect para la ejecución de la cinemática inversa del robot.
- Diseñar e implementar un sistema de comunicación alámbrico o inalámbrico entre la PC y el controlador del robot.
- Realizar las pruebas de comunicación y locomoción para verificar el óptimo funcionamiento del proyecto.

Para el desarrollo de esta investigación se trabajó con: **Revisión documental**, para adquirir información relacionada con el funcionamiento de los dispositivos utilizados. **Sistematización**, en base a las bibliografías revisada, se pudo experimentar el proceso más adecuado para la implementación. **Análisis y síntesis**, se evaluó los datos obtenidos por el sensor mediante cinemática inversa. **Experimentación**, se realizaron pruebas en los dispositivos para verificar su funcionamiento. **Observación**, para la comparación de los datos obtenidos, en cada una de las pruebas. **Estadística**, para obtener el porcentaje de precisión del sistema y el grado de aceptación del prototipo al trabajar con los niños.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.

1.1 Introducción

El presente capítulo constituye el estudio teórico para el desarrollo del proyecto, la selección de los programas y los elementos que lo conforman, los cuales deben satisfacer los siguientes requerimientos:

Hardware:

- Los datos del teleoperador captados por el sensor deben ser precisos.
- Para la comunicación se necesita dispositivos que transmitan datos a una distancia de 13m.
- La estructura del robot tiene que permitir un libre movimiento de las extremidades para llegar a las posiciones deseadas.
- El funcionamiento continuo del prototipo debe ser por un lapso de 30 minutos como mínimo, y alertar al operador cuando su sistema de alimentación este por agotarse.

Software:

- Adquisición de datos correspondientes a las articulaciones de operador.
- El procesamiento de los datos se realiza con la consideración de que el proyecto no toma en cuenta el centro de gravedad del robot.
- La transmisión de los datos debe ser en tiempo real para que el retardo entre los movimientos del teleoperador y los del robot sea mínimo.
- La placa controladora debe tomar en cuenta las limitaciones físicas del robot para que sus servomotores no sean forzados y sufran daños.
- Desarrollo de una interfaz gráfica para que el usuario interactúe fácilmente con el sistema.

Tomando en cuenta estos aspectos se obtuvo un sistema acorde al presupuesto y requerimientos, para cumplir los objetivos planteados.

1.2 Discapacidad

La Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF) define la discapacidad como un término genérico que abarca deficiencias, limitaciones de la actividad y restricciones a la participación. Se entiende por discapacidad la interacción entre las personas que padecen alguna enfermedad, factores personales y ambientales. Se calcula que más de mil millones de personas de la población mundial se encuentran aquejadas por la discapacidad en alguna forma. Tienen dificultades importantes para funcionar entre 110 millones (2,2%) y 190 millones (3,8%) personas mayores de 15 años (OMS) (OPORTUNIDAD).

Los tipos de discapacidades que podemos encontrar son:

- **Discapacidad Motriz:** Se refiere a la pérdida o limitación de una persona para moverse, caminar, mantener algunas posturas de todo el cuerpo o de una parte del mismo.
- **Discapacidad Física:** Cuenta con las alteraciones más frecuentes, las cuales son secuelas de poliomielitis, lesión modular y amputaciones.
- **Discapacidad Visual:** Incluye la pérdida total de la vista, así como la dificultad para ver con uno o ambos ojos.
- **Discapacidad Intelectual:** Se caracteriza por una disminución de las funciones mentales superiores, así como de las funciones motoras.
- **Discapacidad de lenguaje:** Se refiere a personas con deficiencias en la elaboración del lenguaje, la producción y/o emisión del habla, y los trastornos de la voz.

1.2.1 Discapacidad en Ecuador

La discapacidad en el Ecuador según datos obtenidos por el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS) muestra la existencia de unas 418.00 personas con algún tipo de discapacidad como se aprecia en la tabla 1.1.

Tabla 1-1: Tipo de discapacidad actual.

| TIPO DE DISCAPACIDAD ACTUAL | |
|------------------------------------|---------|
| Auditiva | 53,565 |
| Física | 196,758 |
| Intelectual | 93,989 |
| Lenguaje | 5,617 |
| Psicosocial | 18,728 |
| Visual | 49,344 |
| Total general | 418,001 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Fuente: <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>

1.2.2 Deficiencia de lenguaje

En el Ecuador los trastornos del lenguaje son una patología habitual en la infancia, que preocupa a padres y médicos ya que al no ser correctamente tratadas puede acarrear deficiencias por el resto de vida del ser humano y conllevar a diferentes actitudes o cambios en quien lo padece. En todo el país se encuentran registradas alrededor de 5.617 personas con esta anomalía de las cuales solo en la Provincia de Chimborazo se pueden encontrar 162 entre niños y adultos (CONADIS).

1.2.3 Terapia del Lenguaje

La terapia del lenguaje o terapia del habla y del lenguaje, es el tratamiento correspondiente para corregir problemas en el habla o dificultades de aprendizaje y uso del lenguaje, siendo los menores los pacientes con mayor incidencia, debido a que es en la edad temprana donde el lenguaje se aprende y desarrolla. Es importante tener en cuenta que las discapacidades del habla se refieren a los problemas de fonación, en otras palabras, la producción de los sonidos. Y por otro lado están los problemas de aprendizaje o uso del lenguaje, es decir, dificultades para expresarse de forma coherente.

1.3 Robótica

Es una rama de la ingeniería la cual acopla varias áreas como la electrónica, mecánica, informática, física e inteligencia artificial para convertirse en una ciencia que se encarga del diseño, fabricación y la utilización de robots.

La robótica se puede clasificar desde diversos puntos de vista: según su generación, sus funciones, su aprendizaje, su control de trayectoria, sistemas de coordenadas, sistema de programación, aplicación, arquitectura, y otras, además. Según su arquitectura tenemos: robots poliarticulados, zoomórficos, móviles, androides e híbridos. Para la realización del proyecto el estudio se centró en los androides o humanoide, son robots que tratan de parecerse lo más posible al ser humano como se muestra en la figura 1-1, su finalidad es imitar el comportamiento que tiene el hombre en la vida diaria lo cual es muy complejo (JUNE).

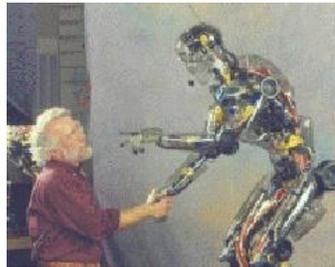


Figura 1-1: Robot Androide.

Fuente: http://www.academia.edu/8104337/Fundamentos_de_Robotica

1.3.1 Selección del robot mini-humanoide.

Para el proyecto se consideraron aspectos importantes como los servomotores que controlan el movimiento dotando de robustez y estabilidad al momento de realizar la cinemática. La familia de actuadores Dynamixel son considerados como los más avanzados y robustos, permiten la conexión serial entre servos, comunicación mediante paquetes, cada servo puede ser identificado al momento de enviar o recibir datos. Permiten leer la posición actual, velocidad, temperatura y torque, disponen de un led, el cual se enciende en caso de falla (RO-BOTICA).

Por estas características se optó por recurrir a un robot mini humanoide que maneje este tipo de servomotores del que se utilizó únicamente la estructura y actuadores, entre los prototipos se consideró los grados de libertad, tipo de actuadores, tamaño, peso, material y costo.

En la tabla 2-1 se presenta una comparación de los modelos de robots.

Tabla 2-1: Comparación modelos de robots.

| Modelo | Bioid Premium | Bioid GP | Darwin-Mini |
|---------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|
| Características | | | |
| Grados de Libertad | 16 | 16 | 16 |
| Actuadores(Servomotores) | Dynamixel Ax-12A | Dynamixel Ax-12A, Ax-18A | Dynamixel XL-320 |
| Tamaño | 397mm | 346mm | 269,3mm |
| Peso | 1,7 kg | 1,6 kg | 1,3 kg |
| Material | Plástico | Aluminio | Plástico |
| Costo | \$1199,00 | \$2799,00 | \$499,00 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para realizar un mejor análisis de la tabla 2-1 es necesario conocer las características que presentan cada uno de los tipos de actuadores, para lo cual se realizó una comparación de cada modelo como se muestra en la tabla 3-1.

Tabla 3-1: Comparación Series Dynamixel.

| Serie | AX-12A | AX-18A | XL-320 |
|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Características | | | |
| Gama | Media | Alta | Baja |
| Voltaje de operación | 9 ~ 12V | 9 ~ 12V | 6 ~ 8,4V |
| Max corriente de operación | 900 mA | 2200 mA | 600 mA |
| Resolución | 0,29° | 0,29° | 0,29° |
| Velocidad sin carga | 59 rpm (12V) 0.169 sec/60° | 97 rpm (12V) 0.103 sec/60° | 114 rpm (7,4V) |
| Ángulo de funcionamiento | 0° ~ 300° | 0° ~ 300° | 0° ~ 300° |
| Temperatura de funcionamiento | -5°C ~ +70°C | -5°C ~ +80°C | -5°C ~ +70°C |
| Relación de transmisión | 1/254 | 1/254 | 1/238 |
| Costo | \$44,90 | \$94,90 | \$21,90 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Se puede observar que los servomotores XL-320 (TROSSENROBOTICS:h) son poco robustos por su gama baja, su relación de transmisión es menor, los otros modelos de actuadores tienen características importantes, el AX-12A (TROSSENROBOTICS:f) presenta un menor consumo de corriente optimizando el tiempo de duración de la batería, el AX-18A presenta mayor velocidad, llega al punto final en un menor tiempo (TROSSENROBOTICS:g). Para el proyecto es de mayor importancia el tiempo de consumo del prototipo, por ello se optó por los servomotores AX-12A, el que se muestra en la figura 2-1.



Figura 2-1: Servomotor AX-12A.

Fuente: <http://cosasdeingenieria.com/esp/item/497/59/servomotor-dynamixel-ax-12a>

La conexión entre los servomotores AX-12A para que puedan comunicarse es de forma serial, se lo realiza como muestra la figura 3-1. Para más detalles de la conexión del servomotor ir al Anexo C.

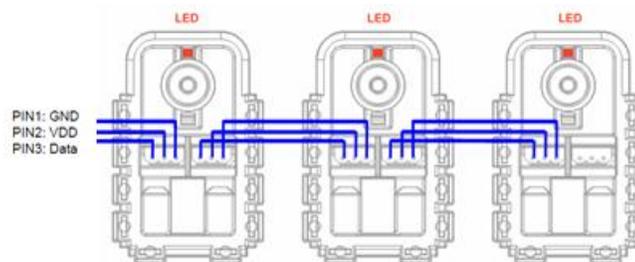


Figura 3-1: Conexión Serial Servomotores Dynamixel.

Fuente: <http://forums.trossenrobotics.com/attachment.php?attachmentid=6497&d=1457714620>

Analizada la tabla 2-1, se concluye que el Robot Darwin-Mini (TROSSENROBOTICS:e) es básico y poco estable mientras que el Robot Bioloid Premium (TROSSENROBOTICS:c) presenta características similares al Robot Bioloid GP (TROSSENROBOTICS:b) en peso y tamaño, tiene como ventaja su estructura que permite modelar nuevas piezas de forma muy sencilla, utiliza los servomotores AX-12A y su precio es menor.

El Robot Bioloid Premium a utilizar se presenta en la figura 4-1.

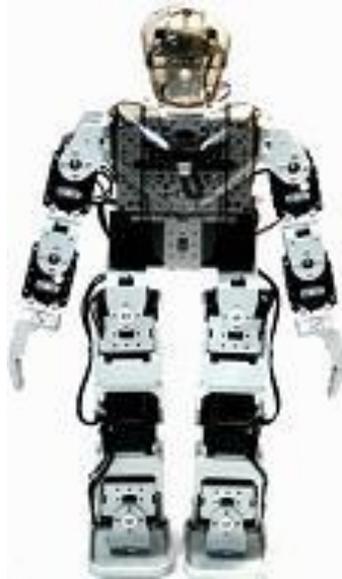


Figura 4-1: Bioloid Premiun.

Fuente: http://www.hightechscience.org/Bioloid_Premium_2c.JPG

1.4 Tarjeta de Desarrollo para control

En un inicio la aplicación de la electrónica con la ausencia de tarjetas de desarrollo conllevaba a que las personas diseñen sus propios circuitos para lo que se requería tiempo y gran número de cálculos matemáticos, incluyendo un número elevado de elementos electrónicos. Con la aparición de las tarjetas de desarrollo se logró resolver varios problemas, estas tienen como ventaja reprogramar sus entradas y salidas tanto analógicas como digitales (GONZALES).

1.4.1 Selección de la Tarjeta de Desarrollo para el Control

Se consideraron aquellas tarjetas que presentan compatibilidad con los servomotores Dynamixel. La tabla 5-1 muestra el análisis entre las mismas.

Tabla 4-1: Comparación Tarjetas de Desarrollo para Servomotores Dynamixel.

| Tarjeta Características | Robotis CM-700 | Robocontroller Arbotix-M | Arduino Mega |
|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Controlador | ATMEGA644P | ATMEGA2561 | ATMEGA328 |
| Voltaje de operación | 7 ~ 35V | 7 ~ 16V | 7 ~ 12V |
| Max corriente de operación | 40 mA | 40 mA | 40 mA |
| Peso | 37,3 g | 23,2g | 25 g |
| Puerto para Servos Dynamixel | 4 de 3 pines 5 de 4 pines | 3 de 3 pines | No tiene |
| Zócalo para comunicación inalámbrica | No tiene puerto directo | Puerto para Xbee | No tiene puerto directo |
| Costo | \$119,90 | \$39,95 | \$29,95 |
| Voltaje de operación | 7 ~ 35V | 7 ~ 16V | 7 ~ 12V |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Del análisis realizado se determinó que las placas que presentan mayor compatibilidad son la Robotis CM-700 (TROSSENROBOTICS:d) y Robocontroller Arbotix-M (TROSSENROBOTICS:a) que tienen procesadores de gama alta, la corriente que pueden suministrar abastece por si sola a los terminales disponibles para servomotores Dynamixel. Para la implementación se seleccionó la placa Robocontroller Arbotix-M que se presenta en la figura 5-1 debido a que tiene un menor peso en relación a la Robotis CM-700 y su costo es más accesible.



Figura 5-1: Arbotix-M Robocontroller.

Fuente: <http://www.trossenrobotics.com/shared/images/PIimages/IL-ARBOTIXM-a.jpg>

La conexión entre la placa Arbotix-M con la PC, se puede realizar por medio del dispositivo UartSBee como se muestra en el diagrama de la figura 6-1. Para más detalles de las conexiones de la placa ir al Anexo B.

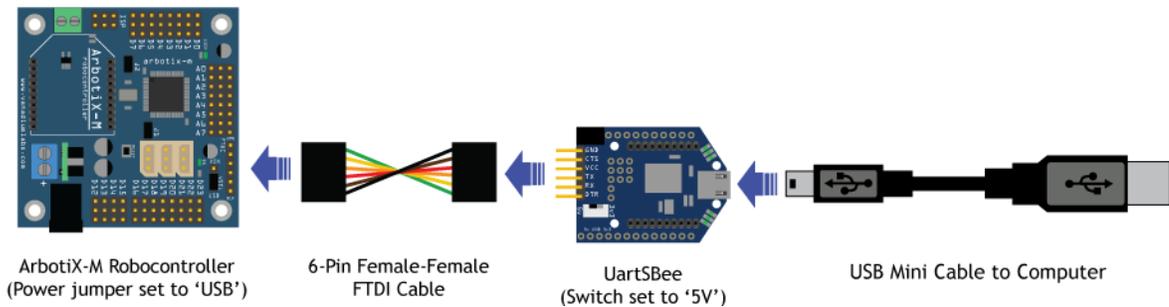


Figura 6-1: Conexión de la placa Arbotix-M al PC.

Fuente: http://learn.trossenrobotics.com/images/tutorials/arbotixM/arbotixm_uartsbce.png

1.5 Sensor Kinect

Es un sensor de profundidad compuesto de tecnología innovadora, desarrollado durante veinte años por la empresa Microsoft como una herramienta de entretenimiento para el hogar, permite interactuar al usuario con Xbox 360. Cuenta con una arquitectura capaz de detectar movimientos, posiciones a las que se encuentra el cuerpo, fuerza ejercida por los músculos y hasta voz. Este avance significativo en la tecnología Kinect actualmente no es utilizado solo como diversión, sino que su campo de aplicaciones ha crecido en diferentes áreas como la ciencia, medicina y animación aprovechando al máximo su potencial (OBREGON).



Figura 7-1: Arquitectura del Sensor Kinect.

Fuente: <https://canaltech.com.br/o-que-e-kinect/Como-funciona-o-Kinect/>

El sensor Kinect que se muestra en la figura 7-1, consta de tres partes básicas para su funcionamiento:

- Cámara RGB, resolución de 640x480 a 30 fps, capta imagen en colores rojo, azul y verde.

- Sensores de profundidad 3D utilizan conjuntamente un proyector de infrarrojos y un sensor CMOS monocromático para proyectar el entorno en 3 dimensiones. Debido a la naturaleza de los sensores no es necesario luminosidad puede captar el ambiente en la oscuridad.
- Un vector múltiple de micrófonos que consta de cuatro autodirigibles para el usuario capaces de aislar el reproductor de sonido de voz. Puede capturar comandos de voz.

La parte del *software* mapea el medio ambiente después de ello busca 20 puntos referentes al cuerpo de la persona para formar una réplica digital 3D del mismo, incluyendo el mapeo de los detalles faciales (OBREGON).

Utiliza también patrones de movimiento en situaciones reales que junto a los puntos de referencia se procesan mediante un algoritmo de aprendizaje automático, desarrollado por Kamie Shoutton, investigador de Microsoft Research Cambridge en Inglaterra. (MICROSOFT)

1.5.1 Datos Técnicos

En la tabla 6-1 se muestran las especificaciones técnicas del sensor Kinect.

Tabla 5-1: Especificaciones técnicas del Kinect.

| | |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensor | <ul style="list-style-type: none"> • Lentes con sensores de color y profundidad • Array de micrófonos para voz • Tilt motorizado para ajuste del sensor |
| Campo de Visión | <ul style="list-style-type: none"> • Campo de visión horizontal: 57 grados • Campo de visión vertical: 43 grados • Rango de tilt físico: ± 27 grados • Rango del sensor de profundidad: 1.2 - 3.5 metros |
| Data Streams | <ul style="list-style-type: none"> • 320x240 profundidad de 16-bit a 30FPS • 640x480 color de 32-bit a 30FPS • 16-bit audio @ 16 kHz |
| Sistema de Tracking de Esqueletos | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de tracking de esqueletos • Puede hacer tracking de hasta seis personas, incluyendo dos jugadores activos • Hace tracking de 20 puntos por jugador activo • Capacidad de hacer mapping de los jugadores activos en avatares de Xbox LIVE |
| Sistema de Audio | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de cancelación de eco para mejorar la entrada de voz • Reconocimiento de voz en varios idiomas |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Fuente: <http://www.eurogamer.es/articles/digitalfoundry-especificaciones-finales-kinect>

1.6 Sistema de Alimentación

Existen en el mercado un sin número de baterías de diferentes tipos capaces de satisfacer la alimentación eléctrica de dispositivos. Todas las baterías tienen un principio de funcionamiento similar compuestas de celdas electroquímicas que al agotarse deben ser cargadas nuevamente.

1.6.1 La batería

Es una celda electroquímica capaz de convertir la energía química en energía eléctrica y acumularla dentro de sí. Cada batería consta de un electrodo positivo (cátodo) y un electrodo negativo (ánodo) que permiten que los iones se muevan entre ellos facilitando que la corriente fluya fuera de la batería y llevar a cabo la función de alimentación de ciertos dispositivos (EQUIPOS Y LABORATORIO). Existen varios tipos de baterías en el mercado, para el proyecto se usó una batería recargable para que sea reutilizada por varias ocasiones.

- **Baterías de Plomo-Acido:** Son muy económicas y fáciles de encontrar, usadas en los automóviles, entre sus desventajas se encuentran su peso y volumen elevado para almacenar carga, en caso de sobrecargas o profundas descargas su vida útil se deteriora (EQUIPOS Y LABORATORIO).
- **Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd):** Pueden ser recargadas fácilmente, admiten sobrecargas y tienen un rango de temperatura para funcionar en varios escenarios, su desventaja es la densidad de energía que permite la que evita que se almacene mucha (EQUIPOS Y LABORATORIO).
- **Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (Ni-Mh):** Se recargan fácilmente, su costo es relativamente bajo, pero no admiten el frío reduciendo su potencia eficaz de entregar energía a pesar de tener mayor capacidad de almacenamiento (EQUIPOS Y LABORATORIO).
- **Baterías de Polímero de Litio (LiPo):** Poseen mayor densidad de energía almacenada, la tasa de descarga es superior, su tamaño y peso son muy reducidos, menor duración que otras baterías, su costo es mayor y debe tener un especial cuidado al momento de sobrecargarlas o descargarlas completamente para que no se deterioren (EQUIPOS Y LABORATORIO).

1.6.2 Selección del Sistema de Alimentación

Para la selección del sistema de alimentación, se realizó una tabla comparativa de las baterías anteriormente descritas utilizando sus datos técnicos como se muestra en la tabla 7-1.

Tabla 6-1: Especificaciones técnicas de las baterías.

| Tipo | Pb | Ni-Cd | Ni-MH | Li-Po |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|
| Voltaje | 12V | 1,2V | 12V | 11,1V |
| Amperios | 1300mA | 1000mA | 1000mA | 1000mA |
| Sobrecarga | No soporta | Soporta | No recomendable | Soporta |
| Recargas | 100 aprox | 500 aprox | 1000 aprox | 5000 aprox |
| Peso (kg) | 0.63 | 0,40 | 0,17 | 0,083 |
| Medidas (mm) | 97 x 43 x 51 | 140 x 14 x 50 | 10.5 x 105 x 44 | 70 x 35 x 15 |
| Tiempo de carga | 2,5 h | 2 h | 5 h | 1 h |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Se eligió la batería de polímero de litio (LiPo) que se muestran en la figura 8-1, debido a que su peso y tamaño es reducido en comparación a las demás baterías, facilitando su montaje dentro de la estructura del robot, soporta sobre carga brindando un voltaje máximo superior a los 11,1V. Estas baterías son muy sensibles si se descargan demasiado y pueden ser recargadas un mayor número de veces que las otras baterías y en un menor tiempo.



Figura 8-1: Batería de Polímero de Litio (LiPo).

Fuente: <http://tdrobotica.co/bateria-lipo-111v-1000mah-para-bioloid/518.html>

1.7 Sistema de Comunicación

El propósito de un sistema de comunicación es transmitir señales de un punto de origen a un destino, localizados en cierta ubicación geográfica (LIZARRAGA), son de gran importancia en la actualidad a nivel mundial. Es una red que permite compartir datos a través del espacio y tiempo, para ello se requiere de un emisor o fuente y de un receptor o punto de destino, esta comunicación se la puede hacer de dos formas alámbrica o inalámbrica.

Para el proyecto se utilizaron los dos tipos de comunicación, garantizando que en caso de haber pérdidas o ruido con la comunicación inalámbrica se puede cambiar sin problema a comunicación alámbrica, mediante la conexión de un cable a la Placa Arbotix-M y al puerto serial de la PC.

La placa Arbotx-M brinda la facilidad para realizar comunicación inalámbrica debido a que en su diseño consta de un zócalo para un módulo Xbee S1 que se muestra en la figura 9-1, el cual transmite datos mediante protocolos punto a punto o multipunto.

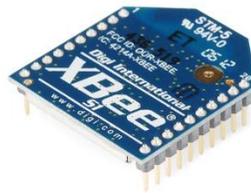


Figura 9-1: Módulo de comunicación inalámbrica Xbee.

Fuente: <http://xbee.cl/xbee-serie-1-configuracion/>

Características:

- Alimentación: 3.3V
- Velocidad de transferencia: 250kbps Max
- Potencia de salida: 1mW o 60mW (+18dBm)
- Alcance: 90metros o 1500 metros aprox.
- Certificado FCC
- 6 pines ADC de 10-bit
- 8 pines digitales IO
- Encriptación 128-bit
- Configuración local o de forma inalámbrica
- Comandos AT o AP

Para ver más detalles de los datos técnicos ir al Anexo D.

1.8 Software para el desarrollo del proyecto.

Existe una gran diversidad de herramientas de *software* que facilitan la realización de diferentes procesos dentro del campo de la programación mediante la obtención, procesamiento y envío de datos hacia dispositivos externos para su funcionamiento. El *software* permite la creación de interfaces amigables mediante las cuales el usuario pueda interactuar y aprovechar la funcionalidad del programa. Dentro de los programas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto se encuentran:

- **Matlab:** Es una herramienta de *software* matemático con lenguaje de programación propio, desarrollado para trabajar con algoritmos de matrices y vectores para la resolución de sistemas de ecuaciones, dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico interactivo (MÁRQUEZ), también cuenta con interfaces de usuario (GUI) en la que se pueden representar datos, comunicarse con otros programas y dispositivos hardware, simular sistemas dinámicos mediante una interfaz de bloques (Don Bosco).
- **LabVIEW:** Es un *software* especializado en el diseño de adquisición de datos, instrumentación y control basado en un lenguaje de programación gráfico. Tiene diferentes librerías extendidas que permiten el control de instrumentos seriales, análisis, presentación y almacenamiento de datos. Consta de un panel frontal que es la interfaz gráfica con el usuario y un diagrama de bloques que es donde se realiza la programación, es decir el código fuente del programa (JOLLY). Cabe recalcar que para el uso de este *software* se dispone de una licencia estudiantil original como se muestra en el Anexo J.
- **Arduino:** Es una herramienta de *software* flexible de código abierto de fácil programación, el lenguaje que opera dentro de Arduino se llama Wiring, basado en la plataforma Processing y primordialmente en el lenguaje de programación C/C++, mediante las múltiples librerías que dispone es capaz de conectarse a otros programas, controlar diferentes actuadores y obtener datos de sensores (ARDUINODHLICS).
- **SolidWorks:** Es un *software* de diseño mecánico en 3D que permite modelar piezas a base de figuras geométricas, se pueden realizar ensambles con las piezas construidas y obtener sus planos para posteriormente ser fabricados (3D CAD).

CAPÍTULO II

2 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO.

2.1 Introducción

El presente capítulo constituye la implementación del *hardware*, análisis matemático para la cinemática del robot y el desarrollo del *software* según los movimientos del teleoperador que son captados por el sensor Kinect, el cual obtiene y muestra las coordenadas de las articulaciones de cada extremidad del cuerpo, en el *software* LabVIEW, estas fueron procesadas para adquirir los ángulos que debe adoptar cada articulación del robot.

Una vez obtenidos los ángulos son etiquetados y transformados en bits para ser leídos por los servomotores, con la ayuda de módulos Xbee, los datos son transmitidos en forma inalámbrica hacia la placa controladora Arbotix-M, la misma que identifica las etiquetas correspondientes al ID de cada servomotor del robot para enviar los ángulos necesarios y que se posicionen de forma similar a las extremidades del teleoperador. El entorno gráfico se realizó con la finalidad de que cualquier persona pueda interactuar con la aplicación, dentro de esta se pueden apreciar las extremidades del usuario, posiciones y coordenadas que se generan con el movimiento, así como los ángulos que toman las articulaciones del robot en tiempo real.

La figura 1-2 muestra el esquema de las etapas en las que se desarrolló el proyecto.

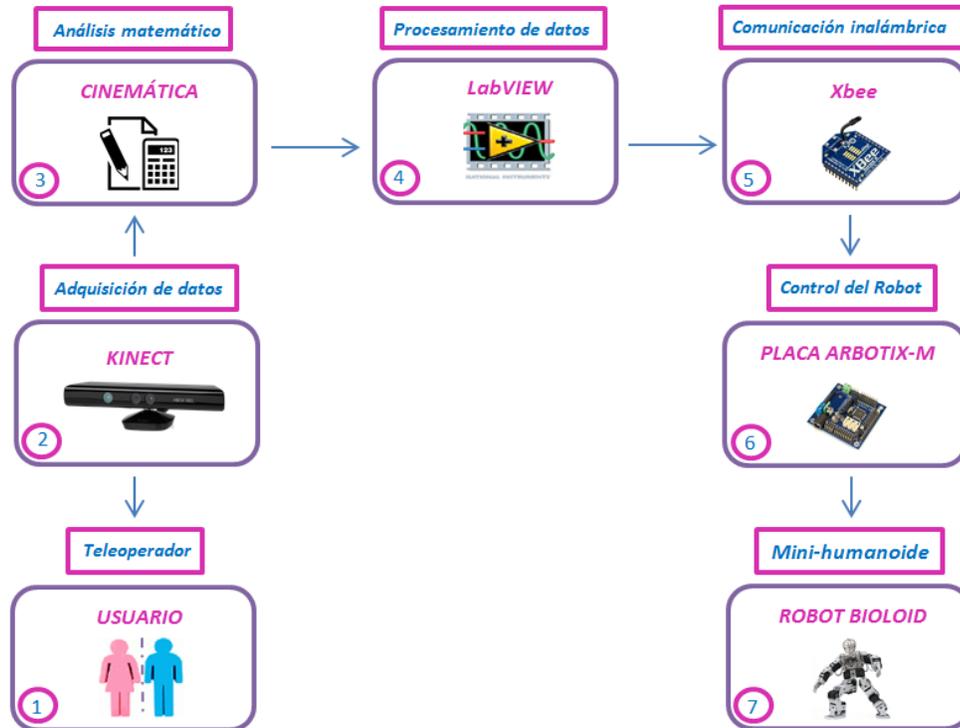


Figura 1-2: Esquema del desarrollo del proyecto.
 Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

- 1) **Teleoperador:** Cada uno de los usuarios que teleoperan el robot.
- 2) **Adquisición de datos:** Toma de datos de las articulaciones en cada movimiento del teleoperador.
- 3) **Análisis matemático:** Se determinaron las ecuaciones para calcular los ángulos de cada una de las articulaciones.
- 4) **Procesamiento de datos:** Se procesó los datos del teleoperador para obtener los ángulos en que deben posicionarse las articulaciones del robot.
- 5) **Comunicación inalámbrica:** Mediante el módulo Xbee emisor, se enviaron los datos obtenidos por el *software* LabVIEW, hacia el módulo receptor instalado en la placa que controla el movimiento de los servomotores del robot.
- 6) **Control del robot:** En placa controladora Arbotix-M se analizó los datos obtenidos por el módulo Xbee para determinar a qué servomotor pertenece cada uno de los ángulos y analizar si el robot está en capacidad de llegar a dicho punto.
- 7) **Mini-humanoide:** Consiste en el robot Bioloid correctamente implementado, el cual tiene la capacidad de simular los movimientos del teleoperador.

2.1 Arquitectura *Hardware* del proyecto

Previamente seleccionados los dispositivos *hardware*, fueron implementados en función a dos bloques comunicados entre sí, el primero conformado por los dispositivos para la Adquisición, Procesamiento y Transmisión de datos, y el segundo conformado por los dispositivos para la Recepción de datos, Control de actuadores y Robot Bioloid.

La figura 2-2 muestra los dispositivos que conforman el primer bloque.

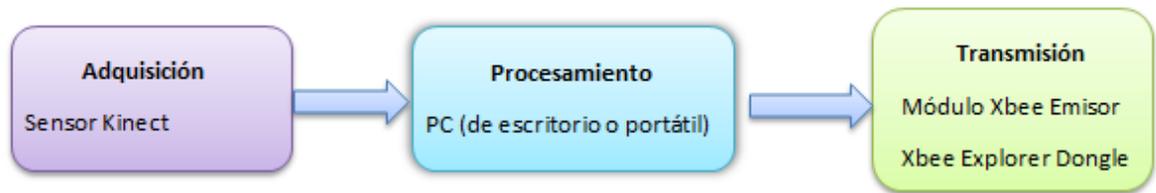


Figura 2-2: Dispositivos del primer bloque.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La figura 3-2 muestra la conexión de cada uno de los elementos del primer bloque para conformar un solo sistema.

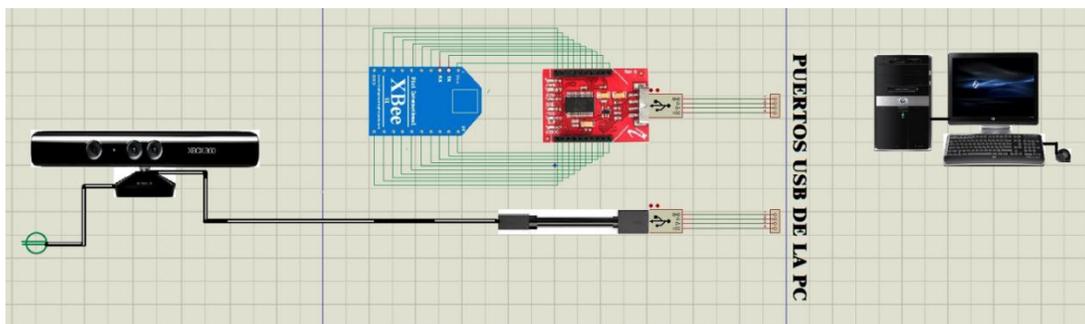


Figura 3-2: Diagrama de conexión primer bloque.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

1. Conectar el enchufe del sensor Kinect al tomacorriente de 110/220V más cercano.
2. Conectar el puerto USB del sensor Kinect al puerto USB del PC.
3. El módulo Xbee emisor se conecta a los terminales del Xbee Socket de la placa Xbee Explorer Dongle.
4. La placa Xbee Explorer Dongle se conecta al PC mediante el puerto USB.

La figura 4-2 muestra los dispositivos que conforman el segundo bloque.

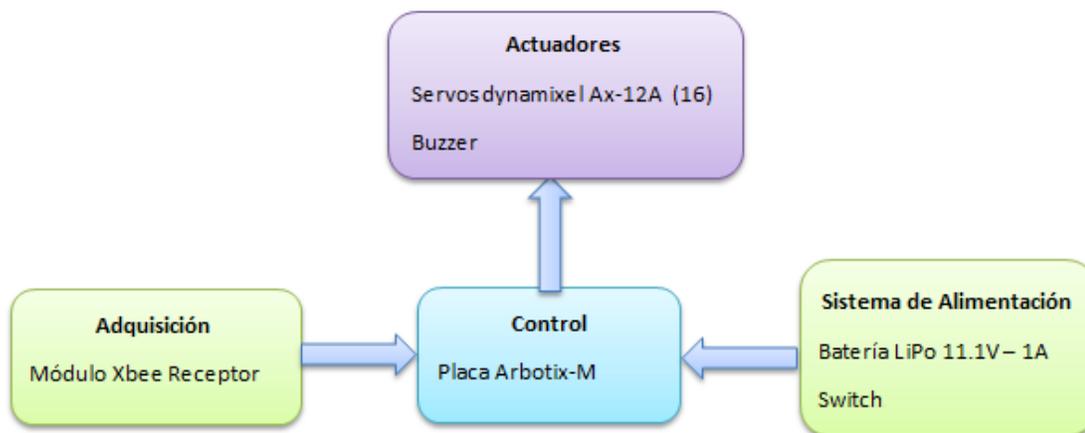


Figura 4-2: Dispositivos del segundo bloque.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.1.1 Implementación del Robot para el proyecto.

Para la implementación del robot físico se siguieron los pasos del manual de usuario correspondiente al armado de brazos (Start págs. 22-25) y piernas (Start págs. 42-51), el Bioloid Premium que se adopto fue el Tipo B, modelo que consta de 16 GDL los cuales están distribuidos de la siguiente manera como se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Distribución de los GDL del Robot.

| Extremidad | GDL | ID Servomotores |
|------------------|-----|-----------------|
| Brazo Derecho | 3 | 1-3-5 |
| Brazo Izquierdo | 3 | 2-4-6 |
| Cadera | 2 | 7-8 |
| Pierna Derecha | 4 | 11-13-15-17 |
| Pierna Izquierda | 4 | 12-14-16-18 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La figura 5-2 muestra la conexión de cada uno de los elementos del segundo bloque para conformar un solo sistema.

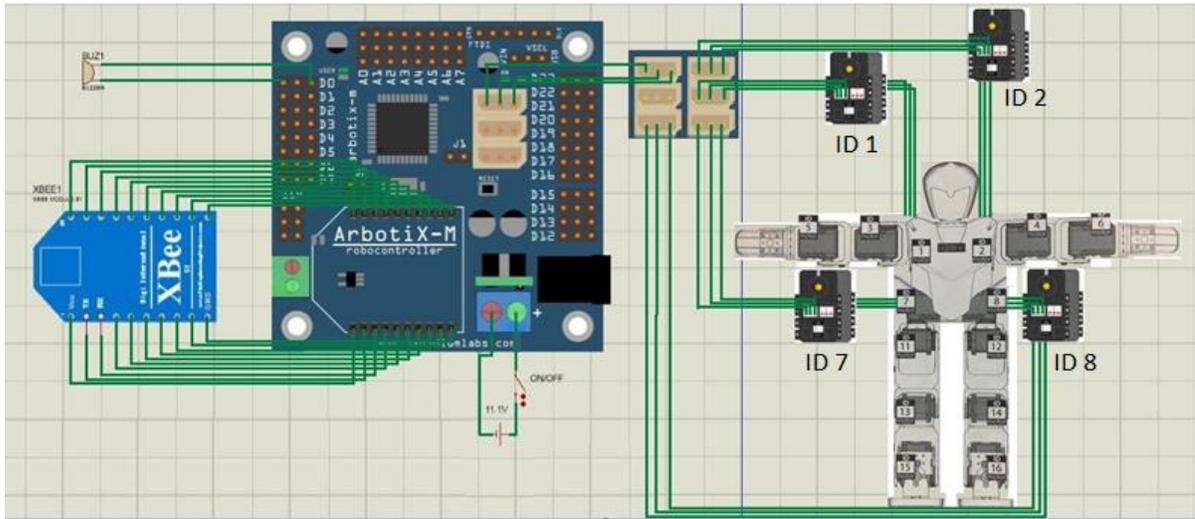


Figura 5-2: Diagrama de conexión del segundo bloque.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Las conexiones de cada elemento se detallan a continuación:

- El módulo Xbee receptor se conecta a los terminales del Xbee Socket ubicado en la parte inferior de la placa Arbotix-M, para permitir la recepción de datos.
- Para la alimentación de la placa se utilizó la batería, los terminales GND de la batería y de la placa Arbotix-M se conectaron entre si y el terminal positivo de la batería fue conectado a un switch, para permitir o interrumpir el paso de energía hacia el terminal Vcc de la placa.
- La placa de expansión para servomotores dynamixel fue conectada por medio de un cable al puerto destinado estos actuadores en la placa Arbotix-M.
- Los servomotores fueron conectados como se detalló en la tabla 1-2, teniendo los terminales de cada una de las extremidades, los servomotores pertenecientes a los ID 1,2,7 y 8 fueron conectados individualmente a la placa de expansión por medio de los cables propios de dynamixel.
- Los terminales de la bocina que funciona como alarma cuando el nivel de alimentación está en su límite inferior, se conectaron el positivo al terminal digital 0 de la placa Arbotix y el negativo al GND.

Modelamiento del soporte para los dispositivos de control en el robot.

Una vez realizadas las conexiones se procedió a modelar el soporte en el que se alojaron los dispositivos, la pieza fue creada en el *software* SolidWorks como se muestra en la figura 6-2, considerando el tamaño de la espalda del robot a la que debe ser acoplada y que todos los dispositivos entren libremente. Fue construida en ABS debido a que este material es ligero y no afecta en la estabilidad y equilibrio del robot.

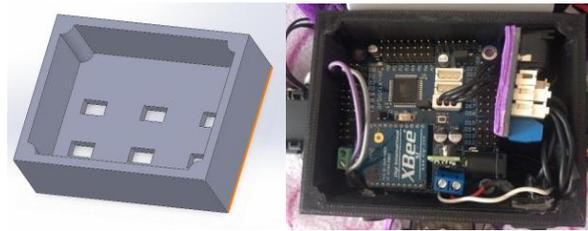


Figura 6-2: Modelamiento del soporte para la placa controladora.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La figura 7-2 muestra el robot Bioloid Tipo B ya implementado con todos los elementos que conforman el segundo bloque.



Figura 7-2: Bioloid Premium Tipo B implementado
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.2 Análisis Matemático para la cinemática de las extremidades del Robot.

Para la realización del proyecto fue necesario encontrar la cinemática inversa del robot, debido a que mediante el sensor kinect se conocen las coordenadas de las extremidades del teleoperador a las cuales debe llegar el robot. El análisis cinemático del robot se realizó por cada extremidad de forma individual, tomando en cuenta que, al hallar la cinemática de una extremidad inferior como de una superior, esta se replica para su par.

Para la solución de la cinemática inversa se dispone de varios métodos de solución, uno común es el método geométrico que se usa si se tienen pocos GDL, otro es el método de Denavit Hartenberg utiliza un algoritmo interactivo basado en matrices homogéneas; para varios GDL es recomendable realizar un desacoplamiento cinemático el cual permite hallar datos de forma más sencilla resolviendo independientemente los primeros GDL que están dedicados al posicionamiento de los últimos destinados a la orientación.

2.2.1 Cinemática Inversa del Brazo

Para el análisis cinemático inverso del brazo, se realizó por dos métodos, de esta forma se compararon los resultados obtenidos, para determinar el más práctico y sencillo de resolver.

2.2.1.1 Método Geométrico

Este método obtiene los valores de las primeras articulares que son las que posicionan el extremo del robot, utiliza relaciones trigonométricas y geométricas, para ello se recurre a la solución de los triángulos que se forman con los elementos y articulaciones.

La figura 8-2 muestra la estructura física del brazo, en la figura 9-2 se puede observar el esquema geométrico del brazo del cual se procedió a realizar los cálculos matemáticos para obtener las ecuaciones de los ángulos que gobernarán el movimiento del mismo.



Figura 8-2: Estructura física del brazo.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

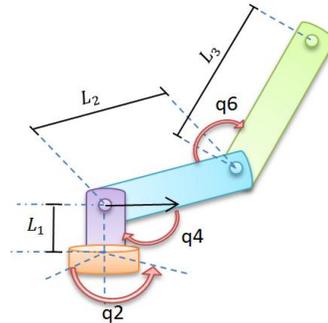


Figura 9-2: Estructura geométrica de las articulaciones del brazo.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Consideraciones:

- Longitudes de los eslabones
 - L_1 : Longitud entre los dos servos del hombro, es casi despreciable
 - L_2 : Longitud del antebrazo
 - L_3 : Longitud del brazo

- Ángulos de las articulaciones
 - q_2 : Ángulo movimiento vertical del hombro (tilt)
 - q_4 : Ángulo movimiento horizontal del hombro (pan)
 - q_6 : Ángulo movimiento del codo

Procedimiento de la cinemática inversa del brazo.

1. Para hallar el ángulo q_2 , correspondiente al movimiento vertical del hombro, se realizó un esquema independiente como se muestra en la figura 10-2.

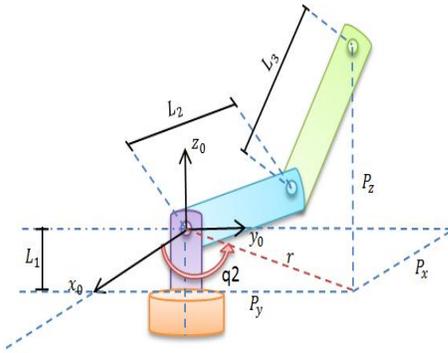


Figura 10-2: Estructura geométrica de la articulación q_2 .
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

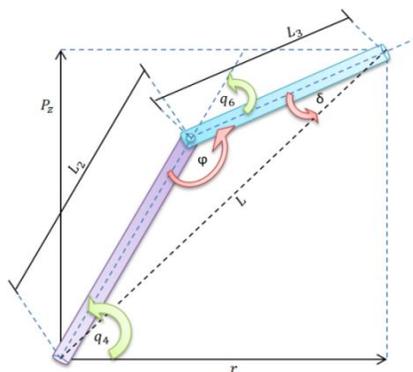
Utilizando el triángulo que forma q_2 con P_Y , P_X y r se puede deducir y expresar la ecuación 1-2.

Ecuación 1-2: Ángulo movimiento vertical del hombro. (MG)

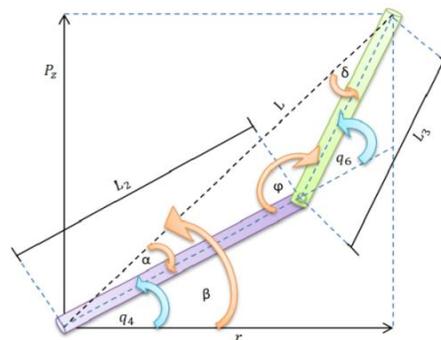
$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_Y}{P_X}\right)$$

- Para hallar el ángulo q_4 y q_6 , correspondiente al movimiento horizontal del hombro y al movimiento del codo respectivamente.

Para encontrar los valores de las articulaciones q_4 y q_6 existen dos posibles configuraciones dependiendo del signo que se tome. La primera con el signo negativo se tiene la configuración de codo arriba como se muestra en la figura 11-2.a y con signo positivo la configuración codo abajo como se muestra en la figura 11-2.b.



11-2.a. Configuración Codo Arriba.



11-2. b. Configuración Codo Abajo

Figura 11-2: Estructura geométrica de la articulación q_4 , q_6 .
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Una vez realizado el proceso matemático para encontrar el ángulo q_6 se llegó a obtener como resultado la ecuación 2-2.

Ecuación 2-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función cos. (MG)

$$\cos q_6 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}$$

Al calcular por medio de ley de senos y cosenos, los ángulos en el segundo y tercer cuadrante del plano cartesiano proporcionan datos erróneos por los signos de las coordenadas; por esta razón es recomendable hacer todos los cálculos en función al arco tangente para evitar tener este tipo de inconvenientes. Aplicando la función arco tangente se obtuvo la ecuación 3-2.

Ecuación 3-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función arctan. (MG)

$$q_6 = \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{1 - \cos^2 q_6}}{\cos q_6}\right)$$

Con la ayuda de la configuración codo abajo de la figura 12-2.b se calcula el ángulo q_4 , que esta expresado por $\beta - \alpha$, como resultado de la sustracción se tiene la ecuación 4-2.

Ecuación 4-2: Ángulo movimiento del codo. (MG)

$$q_4 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L_3 \sin q_6}{L_2 + L_3 \cos q_6}\right)$$

2.2.1.2 Método de Matrices de Transformación Homogéneas por Denavit Hartenberg.

El análisis cinemático inverso con matrices de transformación homogéneas, se realiza a partir de un modelo cinemático directo conociendo las relaciones de posición y orientación del extremo del robot en función de las coordenadas articulares. Una matriz de transformación homogénea consta de cuatro parámetros fundamentales que se muestran en la figura 12-2.

$$T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $r_{3 \times 3}$: Matriz de Rotación.
- $P_{3 \times 1}$: Vector de Traslación.
- $f_{1 \times 3}$: Transformación de Perspectiva (Vector de ceros).
- $w_{1 \times 1}$ Escalado global (1).

Figura 12-2: Matriz de Transformación Homogénea.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Basado en la figura 13-2 de la estructura geométrica de las articulaciones del brazo, se realizó el diagrama del mismo con la asignación de los sistemas de referencia como señala el algoritmo de Denavit Hartenberg.

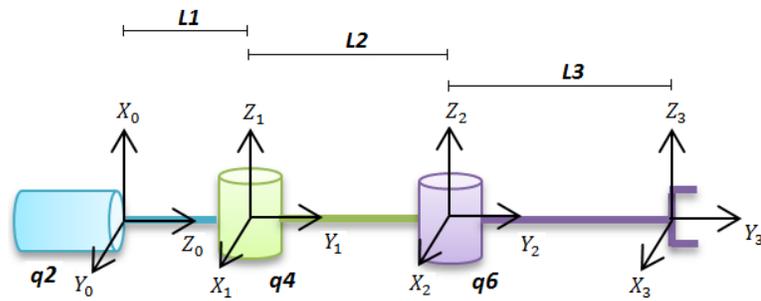


Figura 13-2: Diagrama de cuerpo libre, sistemas de referencia del brazo.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Una vez realizado el algoritmo de DH, se obtiene la matriz con los parámetros de cada articulación del brazo del robot como se muestra en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Tabla de la matriz de los parámetros de Denavit Hartenberg del brazo.

| Art | ϑ | D | A | A |
|-----|-------------|---|-------|----|
| 1 | q_2 | 0 | 0 | 90 |
| 2 | q_4 | 0 | L_2 | 0 |
| 3 | q_6 | 0 | L_3 | 0 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Donde cada parámetro de DH representa:

- ϑ : Ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha; es un parámetro variable en articulaciones giratorias.
- d : Distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i ; es un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
- a : Distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo, en el caso de articulaciones giratorias, en el caso de articulaciones prismáticas se calcula como la distancia más corta ente los ejes z_{i-1} y z_i .
- α : Ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Para obtener la matriz de transformación homogénea T que relaciona el sistema de la base con el extremo final del robot en función de las n coordenadas articulares, se lo realiza mediante el producto de matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$ definida como se muestra la ecuación 5-2.

Ecuación 5-2: Ecuación para encontrar la matriz de Transformación Homogénea.

$${}^{i-1}A_i = T(z, \vartheta_i)T(0,0, d_i)T(a_i, 0,0)T(x, \alpha_i)$$

Resolviendo el producto de matrices de transformación T , obteniéndose la matriz de transformación ${}^{i-1}A_i$, como se muestra en la figura 14-2.

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} c\vartheta_i & -c\alpha_i s\vartheta_i & s\alpha_i s\vartheta_i & a_i c\vartheta_i \\ s\vartheta_i & c\alpha_i c\vartheta_i & -s\alpha_i c\vartheta_i & a_i s\vartheta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 14-2: Matriz de Transformación Homogénea ${}^{i-1}A_i$

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La matriz de transformación T del brazo de robot, se obtuvo mediante el producto de matrices homogéneas con la ayuda de Matlab. Una vez realizado el proceso se muestra el resultado final de la matriz en la figura 15-2 en el que utilizando un sistema de ecuaciones se hallan los valores de los ángulos de las articulaciones del robot.

$$\begin{pmatrix} c_2c_4 & s_2c_4 & s_4 & -L_2 \\ -c_2s_4 & -s_2s_4 & c_4 & 0 \\ s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & L_3c_6 \\ s_6 & c_6 & 0 & L_3s_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 15-2: Matriz de Transformación Homogénea final del Brazo del robot.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Procedimiento para encontrar los ángulos de las articulaciones.

De la matriz final de Denavit Hartenberg, se hallan los ángulos de cada articulación del brazo; para lo cual se siguen los siguientes pasos:

1. Plantear el sistema de ecuaciones de la matriz final mostrada en la figura 16-2, de la cual se obtiene las ecuaciones: 6-2, 7-2 y 8-2.

Ecuación 6-2: Primer Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final.

$$c_2c_4 P_x + s_2c_4 P_y + s_4 P_z - L_2 = L_3c_6$$

Ecuación 7-2: Segundo Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final.

$$-c_2s_4 P_x - s_2s_4 P_y + c_4 P_z = L_3s_6$$

Ecuación 8-2: Tercer Sis. de Ecu. de la Matriz de Transformación Homogénea final.

$$s_2 P_x - c_2 P_y = 0$$

2. Hallar el ángulo q_2 despejando de la ecuación 2.8, de la cual se obtiene la ecuación 2-9.

Ecuación 9-2: Ángulo movimiento vertical del hombro. (DH)

$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

3. Realizado el procedimiento matemático a partir del sistema de ecuaciones de la matriz homogénea final del brazo se obtuvo como resultado las ecuaciones 10-2 y 11-2:

Ecuación 10-2: Ángulo movimiento del codo. (DH)

$$q_4 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L_3s_6}{L_3c_6 + L_2}\right)$$

Ecuación 11-2: Ángulo movimiento horizontal del hombro en función cos. (DH)

$$q_6 = \arccos\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_3^2 - L_2^2}{2L_2L_3}\right)$$

Al igual que en el método anterior es recomendable trabajar con arco tangentes en lugar de arco senos, para no tener problemas con los signos

Una vez resuelta la cinemática inversa por ambos métodos estudiados, se observó que los mismos resultados son los mismos, se pudo concluir que el método más sencillo de resolver fue el método geométrico, por matrices homogéneas es mucho más largo y tedioso, se deben multiplicar cada una de las matrices, esto se complica con mayor número de GDL, al realizarlo a mano se corre el riesgo de cometer errores en la multiplicación de signos provocando tener al final una matriz incorrecta.

2.2.2 *Cinemática Inversa de la Pierna*

En la cinemática inversa de la pierna se utilizó el método geométrico, como se constató en el proceso anterior es mucho más rápido de aplicar. La figura 16-2 muestra el esquema físico de la pierna del robot, en la figura 17-2 se puede observar el esquema geométrico de la pierna del cual se realizaron los cálculos matemáticos para obtener las ecuaciones de los ángulos que gobernarán el movimiento de la misma.



Figura 16-2: Estructura física de la pierna.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

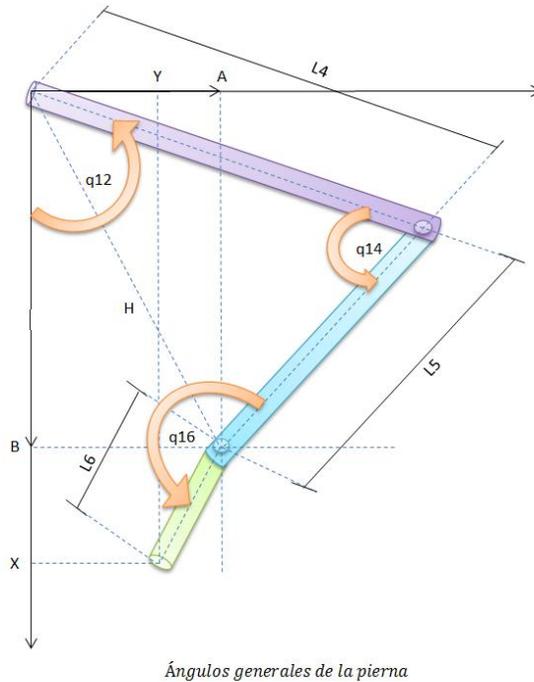


Figura 17-2: Estructura geométrica de las articulaciones de la pierna.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Consideraciones:

- Longitudes de los eslabones
 - L_4 : Longitud del muslo
 - L_5 : Longitud de la pantorrilla
 - L_6 : Longitud del tobillo hacia el piso

- Ángulos de las articulaciones
 - q_8 : Ángulo movimiento vertical de la cadera (tilt)
 - q_{12} : Ángulo movimiento del muslo
 - q_{14} : Ángulo movimiento de la rodilla
 - q_{16} : Ángulo movimiento vertical del tobillo (tilt)
 - q_{18} : Ángulo movimiento horizontal del tobillo (pan)
 - ϑ : Ángulo de cabeceo (ángulo máximo que puede mover el tobillo)

Procedimiento de la cinemática inversa de la pierna

1. Hallar el ángulo q_{12} correspondiente al movimiento del muslo. El ángulo q_{12} está compuesto por la suma de los ángulos α y β como se muestra en la figura 18-2.

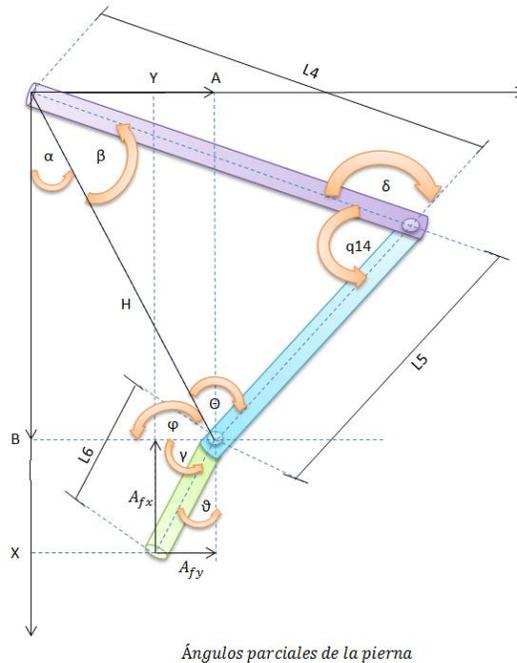


Figura 18-2: Estructura geométrica de los ángulos parciales de la pierna.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para encontrar el ángulo α , se tomó en cuenta las coordenadas de la rodilla obtenidas previamente por del kinect, teniendo como resultado final de la sumatoria la ecuación 12-2.

Ecuación 12-2: Ángulo para el movimiento del muslo. (MG)

$$q_{12} = \arctan\left(\frac{A}{B}\right) + \arcsin\left(\frac{L_3^2 + H^2 - L_4^2}{2L_3H}\right)$$

2. Encontrar los ángulos q_{14} y q_{16} compuesto por la suma de los ángulos θ, φ, γ como se mostró en la figura 19-2, una vez realizado los cálculos geométricos y matemáticos se tiene como resultado ecuaciones 13-2 y 14-2.

Ecuación 13-2: Ángulo para el movimiento de la rodilla. (MG)

$$q_{14} = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - H^2}{2L_3L_4}\right)$$

Ecuación 14-2: Ángulo para el movimiento del tobillo. (MG)

$$q_{16} = 180 - \arccos\left(\frac{L_3^2 + H^2 - L_4^2}{2L_3H}\right) - \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - H^2}{2L_3L_4}\right) + \arccos\left(\frac{A}{H}\right) + \arccos\left(\frac{A_{fx}}{L_6}\right)$$

Se calculó el ángulo de cabeceo como muestra en la ecuación 15-2, que es el ángulo máximo de movimiento del tobillo, para que de esta forma no se produzcan daños en el servomotor que lo controla.

Ecuación 15-2: Ángulo de cabeceo del tobillo. (MG)

$$\vartheta = \arccos\left(\frac{A_{fx}}{L_6}\right)$$

La figura 19-2 muestra la estructura física de la cadera del robot.

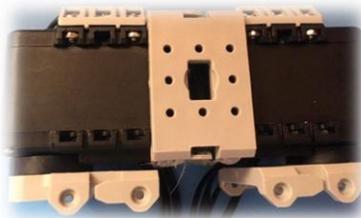


Figura 19-2: Estructura física de la cadera.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Considerando que el movimiento vertical (tilt) que realiza q_8 en la cadera es similar al movimiento que realiza el hombro en el mismo eje, se utilizó la misma ecuación 1-2 para calcular la ecuación 16-2 que corresponde al ángulo q_8 de la cadera, pero con sus respectivos puntos.

Ecuación 16-2: Ángulo movimiento vertical de la cadera. (MG)

$$q_8 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right)$$

Una vez obtenida toda la cinemática del robot, es necesario cambiar el sistema de referencia del robot ya que en la adquisición de datos del Kinect no es el mismo, para lo cual se recurrió a una rotación del sistema. En la matriz de rotación se tomó en cuenta el valor que toman los datos en el eje z del Kinect, si este es menor a cero el sistema rotará en el eje x con la matriz que se muestra a continuación en la figura 20-2.

$${}^0_1 R = \begin{bmatrix} {}^0x_1 & {}^0y_1 & {}^0z_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 20-2: Matriz de Rotación en el eje x.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Cambiando los valores en q_2 de la ecuación 2-2 por las ecuaciones 17-2

Ecuación 17-2: Ángulo movimiento vertical del hombro con rotación en x. (MG)

$$q_2 = \text{arctan}\left(\frac{P_y}{-P_z}\right)$$

Para los ángulos de las piernas se tomarán las mismas consideraciones, es decir se cambiará únicamente cuando los valores del eje z sean menores o mayores a cero, utilizando las matrices de rotación respectivas se realiza un proceso análogo al brazo. Si se desea conocer el procedimiento completo que se realizó para encontrar la cinemática ir al Anexo G.

2.3 Desarrollo del *Software*

En la presente sección se detalló el procedimiento que se realizó para el desarrollo del *software* el cual es encargado de la adquisición, procesamiento, envío, recepción, y control del robot mediante los datos obtenidos por el sensor Kinect de las coordenadas en que se encuentran las extremidades del teleoperador.

2.3.1 Desarrollo en el software LabVIEW.

La figura 21-2 presenta el diagrama de flujo que detalla el proceso realizado en el *software LabVIEW*.

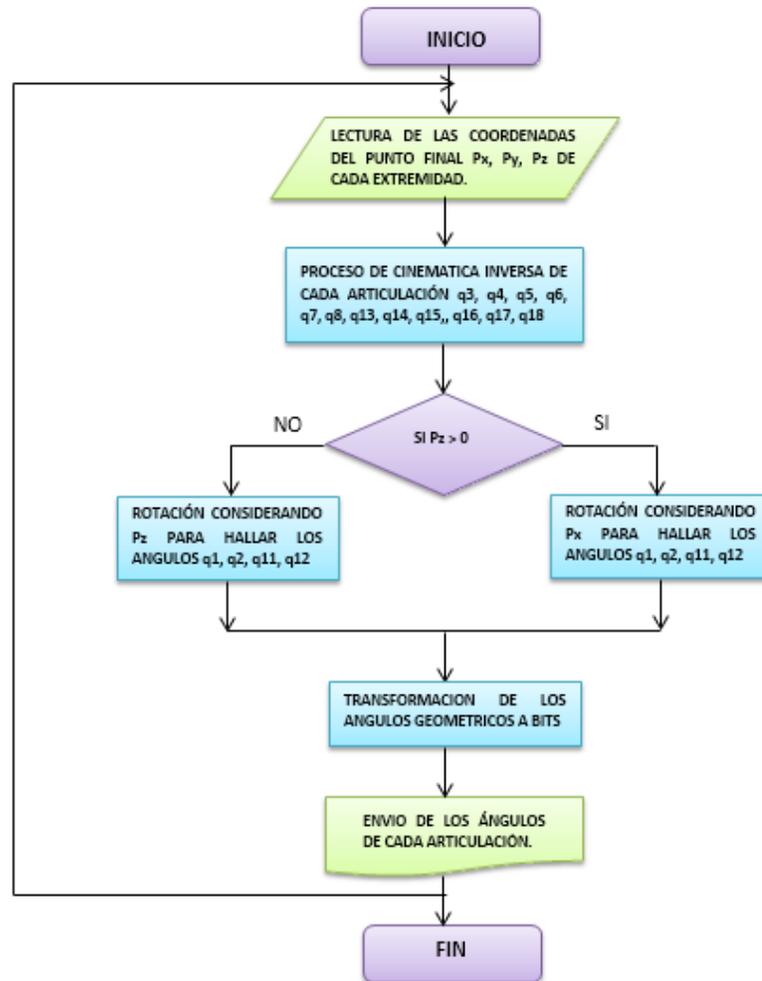


Figura 21-2: Diagrama de flujo para procesamiento de datos.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.1.1 Adquisición de datos en LabVIEW por medio del sensor Kinect.

El sensor Kinect detecta 20 articulaciones del cuerpo humano, permitiendo conocer datos de coordenadas y ángulos a los que se encuentran ubicadas cada una. La figura 22-2 muestra las articulaciones del cuerpo humano captadas por el sensor.

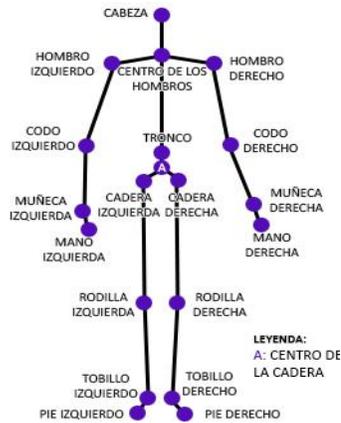


Figura 22-2: Articulaciones captadas por el sensor Kinect.

Fuente: <http://www.taringa.net/comunidades/xbox360/7942028/N-Off-Analysis-profundo-kinect-Xbox-One.html>

El estudio se centró en las articulaciones que conforman las extremidades del usuario que pueden ser enfocadas correctamente mediante la base motorizada del Kinect, que ajusta su inclinación a un campo de visión de 57 grados horizontalmente y 43 grados verticalmente y el conjunto de cámaras que lo conforman permiten seguir el movimiento de un usuario en tiempo real. El toolkit Kinesthesia permitió realizar la lectura de cada punto coordinado (x, y, z) en el que se ubican las articulaciones del teleoperador. Las figuras 23-2 y 24-2 muestran las funciones y adicionales VIs que componen el toolkit.



Figura 23-2: Funciones Toolkit Kinesthesia.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.



Figura 24-2: Additional VIs Toolkit Kinesthesia.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La adquisición y lectura de las coordenadas de cada extremidad del teleoperador desde el dispositivo Kinect se realizó el siguiente proceso.

2.3.2 Inicialización, configuración y cierre de Kinect

La figura 25-2 muestra el proceso de inicialización, configuración y cierre del dispositivo Kinect con el toolkit Kinesteshia.

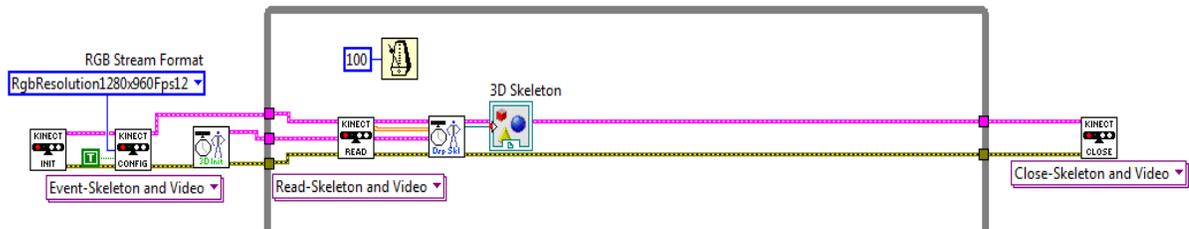


Figura 25-2: Configuración Dispositivo Kinect.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La tabla 3-2 describe las herramientas usadas para el proceso de configuración del dispositivo Kinect.

Tabla 3-2: Herramientas de LabVIEW configuración Kinect.

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>BUCLE WHILE</p>  | Este bucle se encarga de la lectura continua de las coordenadas que toma cada articulación del teleoperador hasta que este presione el botón 'STOP' y el programa se detenga. |
| <p>INITIALISE</p>  | Inicializa el sensor Kinect y crea una instancia entre el mismo y el computador |
| <p>CONFIGURE</p>  | Permite escoger las opciones de visión del Kinect. |
| <p>INITIALISE 3D SKELETON</p>  | Grafica el esqueleto del usuario en 3D con cada una de sus articulaciones |
| <p>READ</p>  | Lee los datos obtenidos por el sensor Kinect para ser tratados y organizados posteriormente |
| <p>RENDER 3D SKELETON</p>  | Crea y muestra la imagen del esqueleto en 3D |
| <p>CLOSE</p>  | Cierra las referencias creadas durante la ejecución de Kinect |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.3 Obtención de las coordenadas de cada articulación del esqueleto.

El proceso de adquisición de datos se lo realiza mediante la función 'Join coordinates' que se conecta a la variable 'Read' del toolkit Kinesthesia para leer las coordenadas a las que se encuentran los puntos de las articulaciones.

Dentro de este bloque se realizó el filtrado de datos considerando que estos son tomados en tiempo real y oscilan debido al ruido asociado a cada lectura, además de ello el sensor Kinect posee una perspectiva de vista posterior al usuario por lo que en ciertas ocasiones pueden repercutir tanto en la toma errónea de los datos en las articulaciones, así como en la deformación del esqueleto del usuario.

Las figuras 26-2 y 27-2 muestran cómo se obtuvieron las coordenadas de las extremidades superiores e inferiores respectivamente.

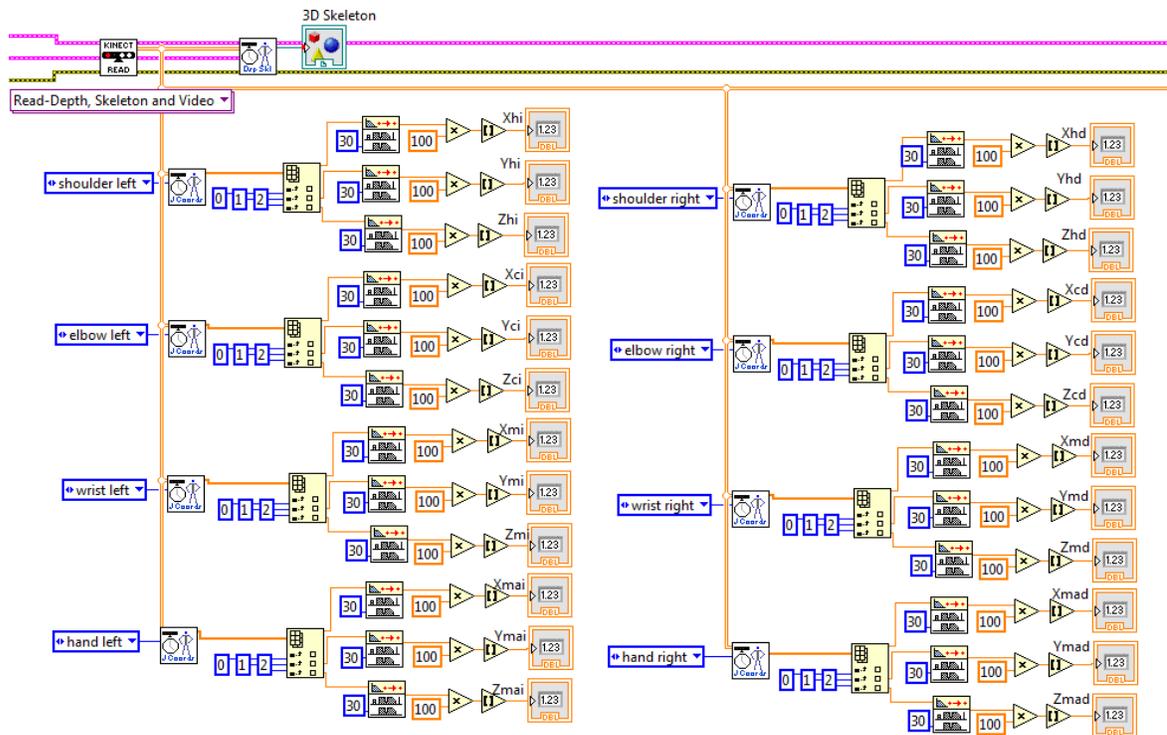


Figura 26-2: Obtención de coordenadas de las extremidades superiores.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

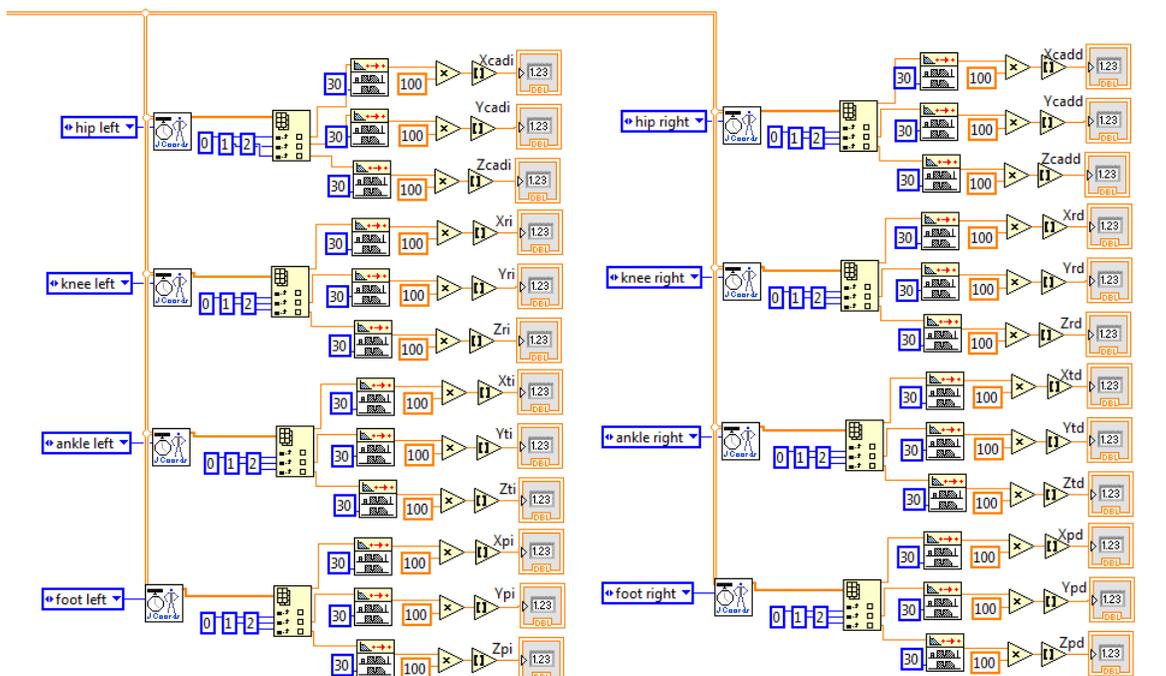


Figura 27-2: Obtención de coordenadas de las extremidades inferiores.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La tabla 4-2 describe las funciones utilizadas para el proceso de obtención de las coordenadas de cada extremidad del teleoperador.

Tabla 4-2: Herramientas de LabVIEW obtención de coordenadas.

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| JOINT COORDINATES  | Determina las coordenadas X, Y, Z de una articulación especificada previamente. |
| INDEX ARRAY  | Devuelve las coordenadas X, Y, Z de la articulación. |
| MEDIAN FILTER  | Saca la media de N datos obtenidos. |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para tener mayor orden en el programa se crearon los SubVIs por cada articulación del esqueleto, los cuales se encargan de compactar la información. La figura 28-2 muestra los subVIs en el interior de un cuadrado azul.

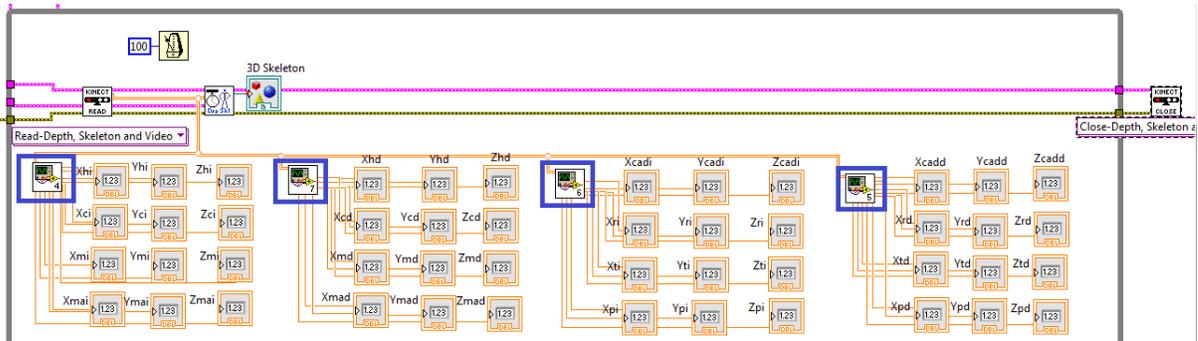


Figura 28-2: SubVIs de cada extremidad.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

La figura 29-2 indica la información dentro del subVI correspondiente al brazo izquierdo. Para las demás extremidades se procedió de igual forma, tomando las coordenadas de cada articulación.

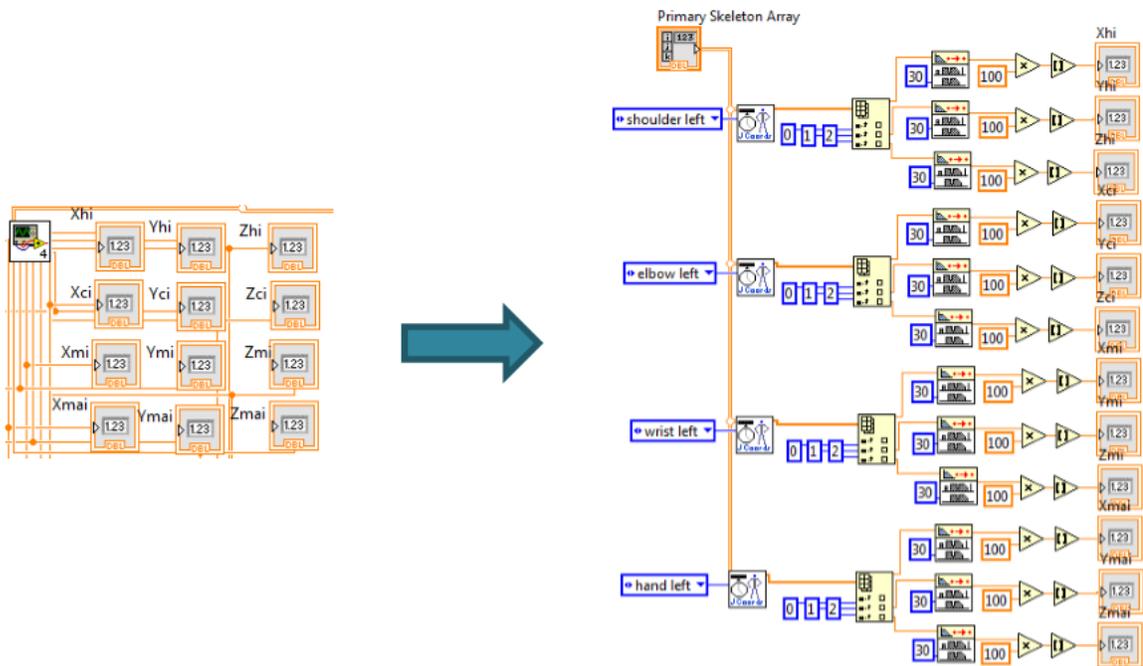


Figura 29-2: Información compactada dentro de un SubVI.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.3.1 Procesamiento de datos en LabVIEW.

Para aplicar los principios de cinemática inversa en cada extremidad del robot, se realizaron los cálculos dentro de la estructura Formula Node, con los resultados y considerando que el robot tiene ciertas limitaciones tanto en el movimiento de extremidades superiores como inferiores, se realizó un tratamiento posterior de los datos obtenidos con la finalidad de evitar que se forcen los servomotores y existan posibles daños en ellos.

Para extremidades superiores se comparó el ángulo obtenido con el ángulo máximo y mínimo de movimiento, así como la rotación según el movimiento que deben realizar como se muestra en la figura 30-2.

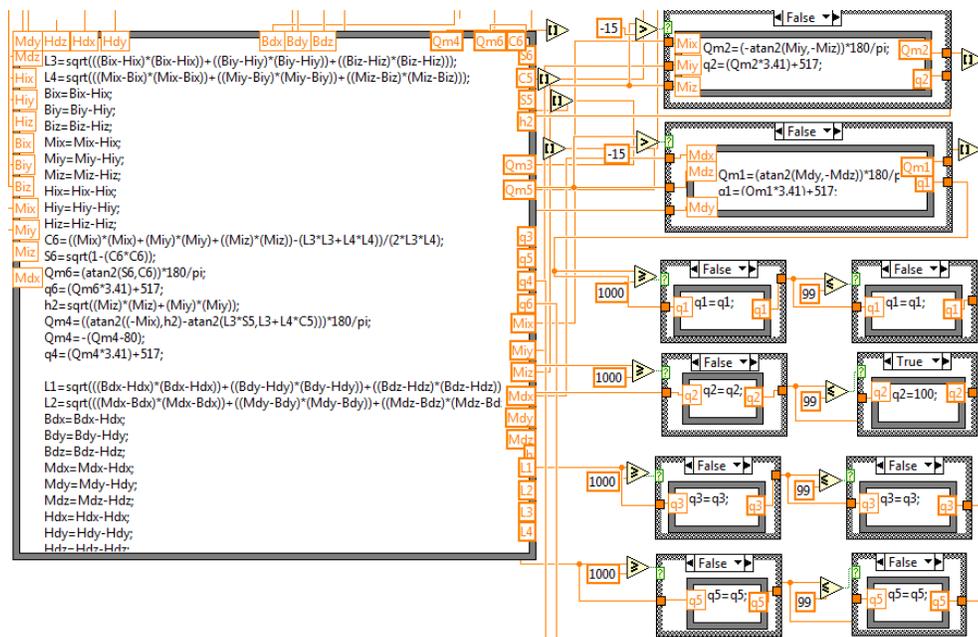


Figura 30-2: Procesamiento extremidades Superiores.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

En el caso de las extremidades inferiores los ángulos de movimiento fueron calculados, pero el no trabajar con el punto de equilibrio fue un problema por lo que también se trataron estos datos de tal forma que simulen las posiciones, hasta el punto en el que el robot no pierda el equilibrio y pueda mantenerse de pie, el procesamiento se muestra en la figura 31-2.

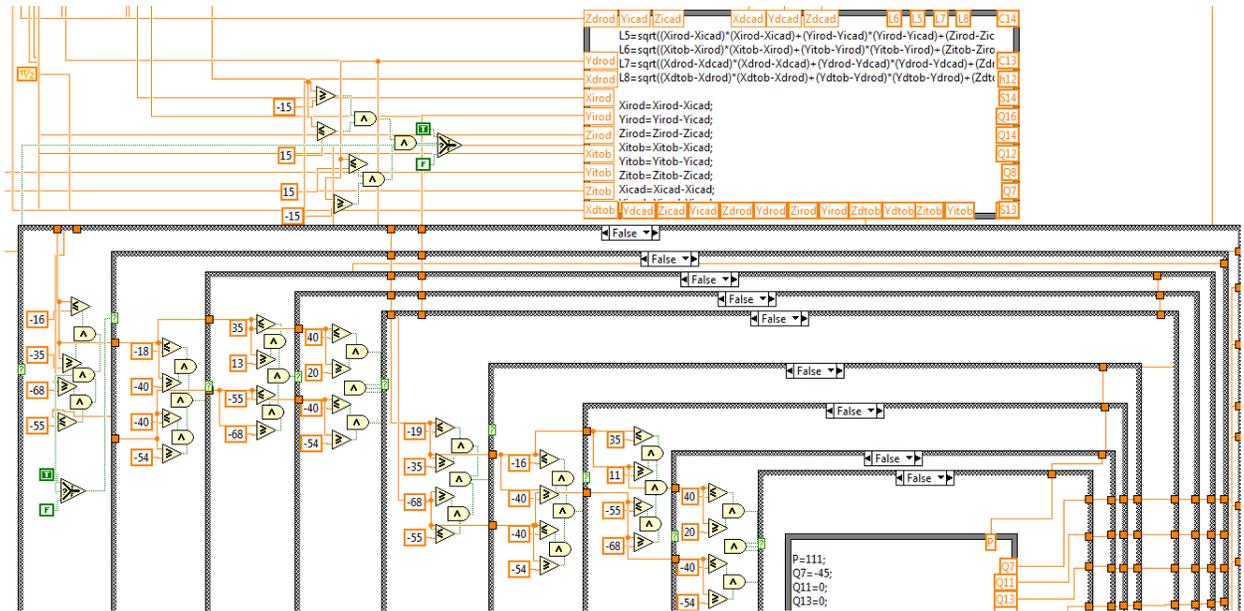


Figura 31-2: Procesamiento extremidades Inferiores.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.4 Transmisión de datos desde LabVIEW.

Los valores de los ángulos finales de cada articulación del robot respecto al teleoperador, fueron convertidos de tipo Numeric a tipo String para ser enviados serialmente a la placa controladora que genera el movimiento de las articulaciones del robot.

Para el envío de los ángulos a cada articulación del robot (16 GDL), estos fueron etiquetados mediante una letra del abecedario que representa el ID de cada uno de los servomotores, luego se concateno la información en una sola cadena en tiempo real.

El proceso de la comunicación se realizó mediante el paquete NI Visa de LabVIEW para puerto serial. La figura 32-2 muestra la programación perteneciente a la comunicación.

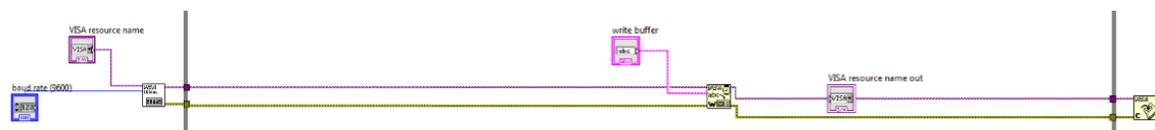


Figura 32-2: Comunicación mediante paquete NI VISA
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.5 Desarrollo de la Interfaz Gráfica de Usuario.

Para el control del programa se desarrolló una interfaz gráfica dentro del *software* LabVIEW, la que permite una fácil interacción del sistema con el usuario posteriormente fue convertido en un archivo ejecutable para evitar posibles daños involuntarios en el código de bloques de programación. Al ingresar y ejecutar el archivo, el usuario podrá interactuar con el entorno que muestra la figura 33-2.



Figura 33-2: Interfaz Gráfica para el usuario en LabVIEW.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Los elementos principales que conforman el programa se detallan a continuación:

- 1- Una vez conectado el módulo Xbee se escoge el puerto de comunicación en el que fue reconocido el modulo para la transmisión de datos desde la aplicación.
- 2- El botón TERMINAR finaliza la ejecución del programa, cierra el sensor Kinect y el puerto de comunicación.
- 3- Muestra las coordenadas **X**, **Y**, **Z**, en que se encuentran las extremidades superiores como el hombro, codo y muñeca de ambos brazos.
- 4- Muestra las coordenadas **X**, **Y**, **Z**, en que se encuentran las extremidades inferiores como la cadera, rodilla y tobillo de las dos piernas.
- 5- Muestra los ángulos calculados en tiempo real que deben tomar las extremidades superiores del robot para simular el movimiento del usuario. Cada ángulo está definido por el ID del servomotor al que pertenece.

- 6- Muestra los ángulos que tomaran las articulaciones de las extremidades inferiores del robot para simular el movimiento del usuario dentro del rango permitido por sus limitaciones para mantener su estabilidad y equilibrio. Cada ángulo está definido por el ID del servomotor al que pertenece.
- 7- Muestra el esqueleto del teleoperador que consta de 20 articulaciones las mismas que cambiaran según sus movimientos.

2.3.6 Desarrollo de los procesos en el software Arduino.

Para el desarrollo del proceso dentro de Arduino se siguió el siguiente diagrama de flujo que se muestra en la figura 34-2.

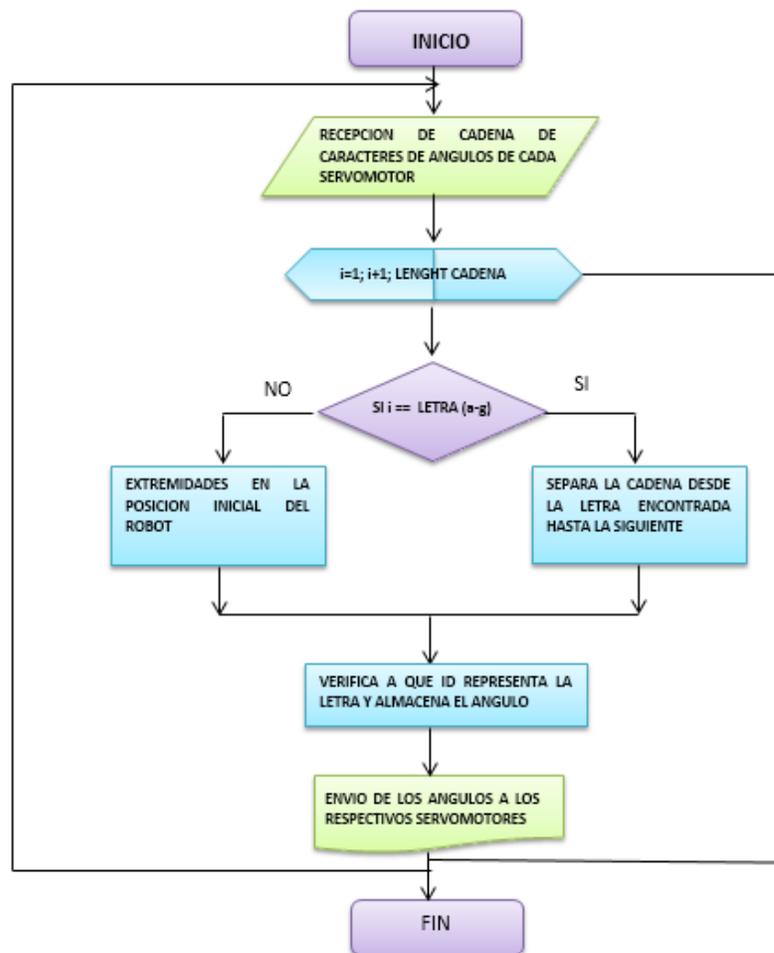


Figura 34-2: Diagrama de flujo del procedimiento de Arduino.
 Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.7 Recepción y procesamiento de datos en la placa controladora Arbotix-M.

La placa Arbotix-M se comunica internamente con el módulo Xbee a una velocidad de 38400 baudios. La configuración para la recepción de datos en la controladora se lo realizo mediante una serie de comando los cuales están descritos en la tabla 5-2.

Tabla 5-2: Comandos para adquirir datos inalámbricamente en Arduino.

| Comando | Descripción |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <code>Serial.begin(38400);</code> | Inicia el puerto serial, tiene como parámetro la velocidad de comunicación en bps que fue configurada en 38400. |
| <code>Serial.available()>0</code> | Compara si hay datos que están llegando por el puerto serial. |
| <code>A=Serial.readString();</code> | Lee los datos que ingresan en el puerto serial en forma de cadena, los cuales son guardados en la variable A. |
| <code>Serial.println(A);</code> | Imprime el valor de la cadena recibida, con ello se puede verificar si llego todo correcto. |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Estos comandos permitieron adquirir los datos enviados desde LabVIEW en forma de cadena. Para el procesamiento de los datos se separó la cadena considerando la etiqueta que identifica cada servomotor y el valor del ángulo en bits que debe adoptar, este proceso se realiza para cada cadena recibida.

2.3.8 Control de los servomotores AX-12 mediante Arbotix-M Robocontroller.

Para el control de los servomotores, fue necesario conocer su funcionamiento, el rango angular en el que se puede mover es mostrado en la figura 35-2.

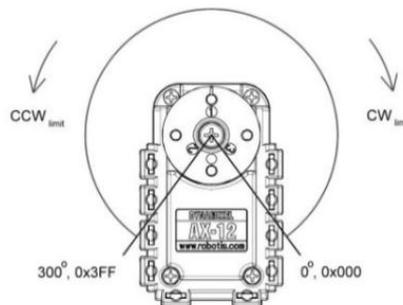


Figura 35-2: Selección placa Arbotix en Arduino

Fuente: http://robotica.unileon.es/index.php/File:Brazo_dynamixel_AX-12.jpg

El rango de movimiento del servomotor es de 0 a 300 grados, los mismos que deben ser transformados de grados a bits que van en un rango de 0 a 1023, para realizar una transformación mediante la resolución del paso del servomotor se puede utilizar la ecuación 18-2.

Ecuación 188-2: Transformación de grados a bits según la resolución del paso del servomotor.

$$q = 0.29 * \vartheta$$

Dónde:

q : Representa el ángulo en bits.

0.29: Resolución del paso del motor.

ϑ : Ángulo en grados.

La posición que se adoptó como el cero del robot fue el ángulo de 150 grados, tomando en cuenta la ecuación 18-2 se tiene el rango máximo y mínimo en bits en el que se moverá el servomotor, como se presenta en la tabla 6-2.

Tabla 6-2: Rango máximo y mínimo para los servomotores AX-12.

| Posición | Ángulo en Grados | Ángulo en Bits |
|----------|------------------|----------------|
| Máximo | 300 | 1023 |
| Cero | 150 | 512 |
| Mínimo | 0 | 0 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para una mejor obtención de los datos en bits se utilizó la ecuación 19-2, con la finalidad de que el servomotor se mueva según los requerimientos para alcanzar ángulos similares al teleoperador.

Ecuación 19-2: Transformación de grados a bits según el cero del servomotor.

$$q = \frac{\vartheta * 1023}{300} + 512$$

Los comandos utilizados en el entorno de Arduino el control de los servomotores son los comandos descritos en la tabla 7-2.

Tabla 7-2: Comandos para configurar los servomotores AX-12 en Arduino.

| Comando | Descripción |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| #include <ax12.h> | Declaración de la librería ax12.h la cual permite que el servomotor AX-12 entienda los comandos que se le envían. |
| SetPosition(ID,angulo); | El comando SetPosition permite mover el servomotor a la posición deseada, tiene dos parámetros que son ID y valor. ID: es el identificador para cada uno de los servos del robot. angulo: es el valor del ángulo en bits al que se quiere mover. |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

2.3.9 Control del nivel de batería dentro de Arduino.

El control del nivel de batería es importante por la sensibilidad de la batería LiPo, para ello se utilizó el buzzer instalado en el robot como dispositivo de alerta en caso de que la batería llegue a su límite de descarga.

Para medir el nivel de batería se utilizaron los comandos descritos en la tabla 8-2, si el nivel es bajo se puede configurar el buzzer de forma digital activándolo con el terminal de conexión en alto, o de forma analógica programando la frecuencia de la nota musical que se desea escuchar.

Tabla 8-2: Comandos para medir el nivel de batería en Arduino.

| Comando | Descripción |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| voltaje =dx1VoltageReport(ID); | Obtiene un reporte del nivel de voltaje en el servomotor y lo guarda en la variable voltaje. |
| if (voltaje < 10.0) | Compara si el valor de la variable voltaje es menor a 10 para activar o desactivar el buzzer. |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para mayor información sobre la utilización del programa y del prototipo ir al Manual de Usuario ubicado en el Anexo A, el código realizado en *software* Arduino se detalla en el anexo H y la programación en el *software* LabVIEW en el Anexo J.

CAPÍTULO III

3 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se aborda el análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas para garantizar el cumplimiento de requerimientos planteados al inicio de la investigación. Se realizaron pruebas de calibración del sensor, precisión de los servomotores, de ángulos obtenidos y procesados en LabVIEW. Así como pruebas de comunicación inalámbrica, de consumo de corriente y rendimiento de la batería. Se ejecutaron encuestas para ver el grado de aceptación y beneficio que brinda el prototipo cuando es aplicado.

3.2 Calibración del sensor Kinect.

Se refiere a la ubicación requerida para captar todos los puntos del cuerpo humano, esta calibración consta de dos fases:

- **Iluminación y espacio en el ambiente.**

Se tomó como referencia datos obtenidos en diferentes investigaciones sobre el ambiente de funcionamiento del Kinect, debido a que no se disponía de un equipo que entregue datos exactos de luxes para identificar la iluminación más óptima de funcionamiento. Se determinó que es de suma importancia que el lugar presente iluminación moderada, se debe evitar el ingreso de rayos solares, el área de funcionamiento debe estar libre de obstáculos y objetos para su correcto funcionamiento.

- **Distancia para la ubicación.**

La distancia del sensor respecto al usuario va en dependencia de la estatura de este, de las pruebas se determinó una altura de referencia de 1,2 m para la ubicación del sensor y una persona de 1,52 m de altura, en base a esta relación se generó la tabla 1-3.

Tabla 1-3: Distancia de ubicación del sensor vs visualización del usuario.

| Distancia (cm) | Visualización |
|------------------|-------------------------------------------|
| [0-84] | No se visualiza al usuario |
|]84-150] | Se visualiza de forma distorsionada |
|]150-210] | Rango Optimo para la Visualización |
|]210-280] | Se visualiza de forma distorsionada |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

De la tabla 1-3 se puede concluir que el rango de detección óptimo del usuario está entre 150 a 210 cm, debido a la perspectiva de visualización que presenta el sensor Kinect se establece que mientras el usuario se encuentre más cerca al sensor, se interpreta como que estuviera lejano, pero mientras más lejos está, es interpretado de mayor tamaño y cercana. Estos efectos se pueden apreciar en la figura 1-3.

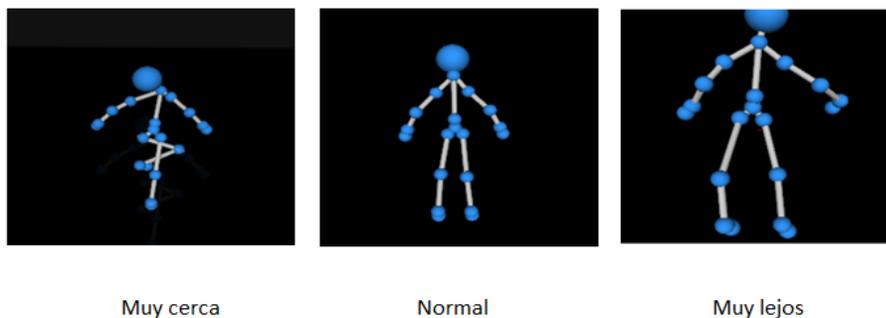


Figura 1-3: Interpretación del usuario por el sensor Kinect en función a la distancia.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

3.3 Medición del grado de precisión en el Servomotor Dynamixel AX-12A

Para relacionar el grado de precisión al representar físicamente un ángulo deseado con el obtenido por el servomotor se realizaron pruebas, una de ellas repitiendo un mismo ángulo y la otra enviando diferentes ángulos. Estas consistieron en tomar cuatro ángulos, uno en cada cuadrante según el sistema de referencia del actuador, para la medición del ángulo obtenido según el ángulo deseado, se generaron ángulos de 75, 115, 180 y 290 en orden aleatorio. Para las pruebas, se consideró el estado de los servomotores como de previa inicialización y en proceso de funcionamiento continuo para verificar si existieron posibles variaciones en los dos estados. El resultado de las pruebas se puede apreciar en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Pruebas ángulos deseados vs ángulos obtenidos en el servomotor.

| Prueba | Primer Ángulo | | Segundo Ángulo | | Tercer Ángulo | | Cuarto Ángulo | |
|--------|---------------|-------|----------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| | Obtenido | Error | Obtenido | Error | Obtenido | Error | Obtenido | Error |
| 1 | 75 | 0 | 115 | 0 | 179,99 | -0,01 | 290 | 0 |
| 2 | 75 | 0 | 115 | 0 | 179,99 | -0,01 | 290 | 0 |
| 3 | 75,01 | 0,01 | 115 | 0 | 180 | 0 | 290 | 0 |
| 4 | 75 | 0 | 115 | 0 | 180 | 0 | 290,01 | 0,01 |
| 5 | 75 | 0 | 115 | 0 | 180 | 0 | 290 | 0 |
| 6 | 75 | 0 | 115 | 0 | 180,01 | 0 | 290,01 | 0,01 |
| 7 | 74,99 | -0,01 | 115,01 | 0,01 | 180 | 0 | 290 | 0 |
| 8 | 75 | 0 | 115 | 0 | 180 | 0 | 289,99 | -0,01 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba de Hipótesis Tabla 2-3

Establecer Hipótesis: Planteamos la hipótesis nula y la alternativa:

H_0 : La media de los ángulos deseados es igual a la media de los ángulos obtenidos.

H_a : La media de los ángulos deseados es diferente a la media de los ángulos obtenidos.

De manera simbólica como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 1-3: Establecimiento Hipótesis grado de precisión en el Servomotor

$$H_0: u_{T1} = u_{T2} \quad \text{y} \quad H_a: u_{T1} \neq u_{T2}$$

Dónde:

u_{T1} : es la media de las medidas de los ángulos deseados;

u_{T2} : es la media de las medidas de los ángulos obtenidos.

Definición del nivel de significancia: Se tomó un nivel de significancia del 5%, es decir, $\alpha = 0,05$.

Número de pruebas y cálculos estadísticos: El número de pruebas realizadas fue de 32, se trata de una prueba bilateral de la media. Por la naturaleza de la prueba, a pesar que el número de datos es mayor a 30, se utilizó el estadístico t de Student para medias de dos muestras emparejadas (referencia t), sus resultados se aprecian en la tabla 3-3 (Ph.D., 1977).

Tabla 3-3: Resultados prueba de hipótesis grado de precisión del Servomotor.

| Prueba t para medias de dos muestras emparejadas | | |
|--------------------------------------------------|--------------------|-----------------|
| | Ángulo Deseado | Ángulo Obtenido |
| Media | 165 | 165,0003125 |
| Varianza | 6825,806452 | 6825,84519 |
| Observaciones | 32 | 32 |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0,999999998 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 31 | |
| Estadístico t | -0,328654739 | |
| P(T<=t) una cola | 0,372313288 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1,695518783 | |
| P(T<=t) dos colas | 0,744626576 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2,039513446 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2016.

Decisión Estadística: La probabilidad a dos colas es mayor al nivel de significancia, se acepta la H_0 , es decir que la media de los ángulos deseados es igual a la de los ángulos obtenidos.

De la prueba de hipótesis, se infiere que no existe gran variación entre el ángulo deseados respecto al ángulo obtenido, por lo cual se puede concluir que el servomotor Dynamixel tiene un alto grado de precisión al momento de fijarse en una determinada posición. La diferencia existente se puede deber a errores en la medición de los ángulos.

3.4 Diferencia ángulos obtenidos del usuario y los calculados para el robot.

Para encontrar las diferencias que existen entre los ángulos generados y los calculados mediante cinemática inversa por el sistema implementado se tomó en cuenta la perspectiva mediante la cual obtiene los datos el sensor, el error de cálculo al aplicar las ecuaciones, el redondeo de los datos obtenidos, las limitaciones físicas propias del diseño del robot y la estabilidad que tiene el mismo al mover sus extremidades hasta un punto. Las pruebas se aplicaron a los dos tipos de extremidades.

- **Articulaciones Superiores.**

Prueba 1: La figura 2-3 muestra al teleoperador y al robot en la posición utilizada para esta prueba y en la tabla 4-3 se presenta los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot, los registrados por el Kinect y el error presente entre ellos.



Figura 2-3: Prueba extremidades superiores robot vs teleoperador.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Tabla 4-3: Primera prueba extremidades superiores.

| Extremidad | Brazo Derecho | | | Brazo Izquierdo | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|---------------|------|--------|-----------------|-------|-------|--------------------|
| | q1 | q3 | q5 | q2 | q4 | q6 | |
| Teleoperador | -7 | 5 | -11 | 11 | 8 | 10 | |
| Robot | -6,87 | 6,32 | -12,80 | 9,90 | 7,14 | 11,96 | |
| Error | 0,13 | 1,32 | -1,80 | -1,10 | -0,86 | 1,96 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 2: La tabla 5-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba dos.

Tabla 5-3: Segunda prueba extremidades superiores.

| Extremidad | Brazo Derecho | | | Brazo Izquierdo | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|---------------|--------|--------|-----------------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | q1 | q3 | q5 | q2 | q4 | q6 | |
| Teleoperador | -20 | -41 | -69 | 18 | 52 | 65 |  |
| Robot | -19,03 | -43,70 | -68,69 | 19,91 | 51,40 | 66,20 | |
| Error | 0,97 | -2,70 | 0,310 | 1,910 | -0,60 | 1, 20 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 3: La tabla 6-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba tres.

Tabla 6-3: Tercera prueba extremidades superiores.

| Extremidad | Brazo Derecho | | | Brazo Izquierdo | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|---------------|--------|--------|-----------------|-------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | q1 | q3 | q5 | q2 | q4 | q6 | |
| Teleoperador | 43 | -40 | -40 | -36 | 55 | 36 |  |
| Robot | 42,7 | -40,10 | -40,67 | -35,70 | 54,80 | 34,14 | |
| Error | -0,3 | -0,10 | -0,670 | 0,30 | -0,20 | -1,86 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 4: La tabla 7-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba cuatro.

Tabla 7-3: Cuarta prueba extremidades superiores.

| Extremidad | Brazo Derecho | | | Brazo Izquierdo | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|---------------|--------|--------|-----------------|-------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | q1 | q3 | q5 | q2 | q4 | q6 | |
| Teleoperador | -55 | -43 | -53 | -3 | 88 | 15 |  |
| Robot | -54,10 | -41,40 | -56,10 | -5,20 | 89,60 | 16,40 | |
| Error | 0,90 | 1,60 | -3,10 | -2,20 | 1,60 | 1,40 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 5: La tabla 8-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba cinco.

Tabla 8-3: Quinta prueba extremidades superiores.

| Extremidad | Brazo Derecho | | | Brazo Izquierdo | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|---------------|--------|--------|-----------------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | q1 | q3 | q5 | q2 | q4 | q6 | |
| Teleoperador | 38 | -25 | -23 | 43 | 46 | 14 |  |
| Robot | 39,50 | -24,50 | -22,67 | 45,10 | 47,90 | 15,10 | |
| Error | 1,50 | 0,5-0 | 0,33 | 2,10 | 1,90 | 1,10 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba de Hipótesis para la similitud de los movimientos extremidades superiores.

Establecer Hipótesis: Planteamos la hipótesis nula y la alternativa:

H_0 : La media de los ángulos calculados es igual a la media de los ángulos obtenidos por el Kinect.

H_a : La media de los ángulos calculados es diferente a la media de los ángulos obtenidos por el Kinect.

De manera simbólica como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 2-3: Establecimiento Hipótesis grado de similitud entre el teleoperador y el robot.

$$H_0: u_{T1} = u_{T2} \quad \text{y} \quad H_a: u_{T1} \neq u_{T2}$$

Dónde:

u_{T1} : es la media de las medidas de los ángulos deseados;

u_{T2} : es la media de las medidas de los ángulos obtenidos.

Definición del nivel de significancia: Se tomó un nivel de significancia del 5%, es decir, $\alpha = 0,05$.

Número de pruebas y cálculos estadísticos: El número de pruebas realizadas fue de 30, se trata de una prueba bilateral de la media.

Se utilizó el estadístico t de Student para la prueba de hipótesis de los datos mostrados anteriormente, como se muestra en la tabla 9-3.

Tabla 9-3: Resultados prueba de hipótesis grado de similitud extremidades superiores.

| Prueba t para medias de dos muestras emparejadas | | |
|---------------------------------------------------------|---------------------|--------------|
| | Teleoperador | Robot |
| Media | 1,8 | 1,897 |
| Varianza | 2018,57931 | 2020,23796 |
| Observaciones | 30 | 30 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0,99955956 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 29 | |
| Estadístico t | -0,3983088 | |
| P(T<=t) una cola | 0,34666001 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1,69912703 | |
| P(T<=t) dos colas | 0,69332001 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2,04522964 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Decisión Estadística: La probabilidad a dos colas es mayor que el nivel de significancia, por lo que no se rechaza la H_0 , es decir que la media de los ángulos calculados es igual a la de los ángulos obtenidos por el Kinect.

De la prueba de hipótesis mediante las medias encontradas, se infiere que no existe variación entre el ángulo calculado respecto al obtenido por el Kinect, por lo que se concluye que el robot mini-humanoide tiene un 95% de similitud al momento de interpretar los movimientos de las extremidades superiores del teleoperador, valor que está en función de la naturaleza del proyecto.

- **Articulaciones Inferiores.**

Prueba 1: La figura 7-3 muestra al teleoperador en la posición utilizada para la prueba 1 de las extremidades inferiores y la tabla 10-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect.



Figura 3-3: Prueba extremidades inferiores robot vs teleoperador.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Tabla 10-3: Primera prueba extremidades inferiores.

| Extremidad | Cadera | | Pierna Derecha | | | | Pierna Izquierda | | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|--------|----|----------------|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|--------------------|
| | q7 | q8 | q11 | q13 | q15 | q17 | q12 | q14 | q16 | q18 | |
| Robot | -45 | 45 | 18 | 0 | 0 | 13 | 71 | 71 | 0 | 0 | |
| Teleoperador | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 65 | 80 | 0 | 0 | |
| Error | -45 | 45 | 18 | 0 | 0 | -1 | -6 | 9 | 0 | 0 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 2: La tabla 11-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba dos.

Tabla 11-3: Segunda prueba extremidades inferiores.

| Extremidad | Cadera | | Pierna Derecha | | | | Pierna Izquierda | | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|--------|----|----------------|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|--------------------|
| | q7 | q8 | q11 | q13 | q15 | q17 | q12 | q14 | q16 | q18 | |
| Robot | -45 | 45 | -45 | -56 | 0 | 0 | -14 | 0 | 0 | -12 | |
| Teleoperador | 0 | 0 | -35 | -60 | 0 | -5 | 45 | 0 | 0 | -10 | |
| Error | -45 | 45 | 10 | -4 | 0 | -5 | 59 | 0 | 0 | 2 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Prueba 3: La tabla 12-3 muestra el error entre los resultados obtenidos por cálculo e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect en la prueba tres.

Tabla 12-3: Tercera prueba extremidades inferiores.

| Extremidad | Cadera | | Pierna Derecha | | | | Pierna Izquierda | | | | Perspectiva Kinect |
|--------------|--------|----|----------------|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | q7 | q8 | q11 | q13 | q15 | q17 | q12 | q14 | q16 | q18 |  |
| Robot | -45 | 45 | -14 | 0 | 0 | 13 | -45 | 45 | 0 | 0 | |
| Teleoperador | 0 | 0 | 25 | 0 | 0 | 30 | -45 | 47 | 0 | 8 | |
| Error | -45 | 45 | 39 | 0 | 0 | 17 | 0 | 2 | 0 | 8 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Para encontrar el estadístico t que se muestra en la tabla 13-3, se realizó una consideración muy importante, el ángulo de 45 grados que mueve la cadera del robot para poder posicionar su pierna de forma recta en el eje de coordenadas es igual a cero grados de la cadera del teleoperador. El cambio en el valor de este ángulo respecto a los demás, se debe al momento de la implementación del robot físico, para facilidad en el armado es necesario posicionar los servomotores de la cadera a 45 grados.

Tabla 13-3: Resultados prueba de hipótesis grado de similitud extremidades inferiores.

| Prueba t para medias de dos muestras emparejadas | | |
|--------------------------------------------------|--------------------|-------------|
| | Teleoperador | Robot |
| Media | 5,233333333 | 1,5 |
| Varianza | 1203,288506 | 1123,224138 |
| Observaciones | 30 | 30 |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0,918612014 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 29 | |
| Estadístico t | 1,481076921 | |
| P(T<=t) una cola | 0,074685208 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1,699127027 | |
| P(T<=t) dos colas | 0,149370417 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2,045229642 | |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

De las pruebas realizadas en las extremidades inferiores no se obtuvo mayor coincidencia entre los ángulos calculados e interpretados por el robot y los registrados por el Kinect ya que al no trabajar con el centro de gravedad el robot tiende a perder el equilibrio en cada movimiento con las piernas, temática que esta fuera de alcance de esta investigación, por ello se restringió sus movimientos con la finalidad de que sea capaz de simular el movimiento del operador sin comprometer equilibrio y la estabilidad del robot.

3.5 Medición del rango máximo de distancia en la comunicación inalámbrica.

Para esta prueba, se tomó en consideración 28 datos, que se aprecian en la figura 4-3, enviados en forma de cadena de caracteres en los cuales consta la etiqueta correspondiente al ángulo de cada articulación y el valor de dicho ángulo en bits.

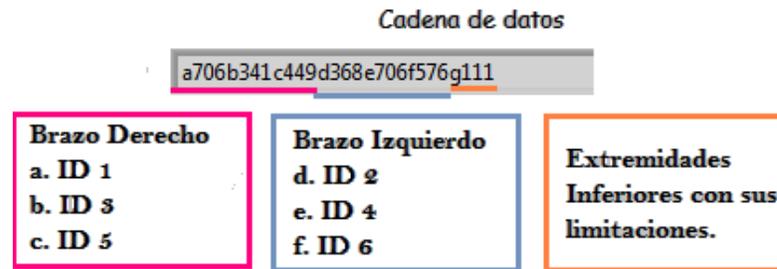


Figura 4-3: Cadena de caracteres.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Las pruebas se realizaron con un tiempo de 5 milisegundos que es valor mínimo que el módulo Xbee se demora en recibir los datos. En tabla 14-3 se muestran los intervalos de distancia en metros y se recibieron los 28 caracteres enviados.

Tabla 14-3: Distancia vs datos recibidos inalámbricamente.

| Datos enviados | Intervalos (m) | Datos Recibidos | Ruido |
|----------------|----------------|-----------------|------------|
| 28 | [1 - 17] | 28 | Sin ruido |
| 28 |]17 - 17,3] | 28 | Bajo ruido |
| 28 |]17,3 – 17,9] | 24-28 | Bajo ruido |
| 28 |]17,9 – 18,6] | 24 | Bajo ruido |
| 28 |]18,6 - 19] | 24-22 | Bajo ruido |
| 28 |]19 – 19,67] | 19 | Alto ruido |
| 56 |]19,7 – 20,2] | 19-16 | Alto ruido |
| 56 |]20,2 – 20,8] | 16 | Alto ruido |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

En la tabla 14-3 se observó que a un intervalo de 1 a 17 m la comunicación es ideal y sin ruido; a distancias mayores a 17 m existe una fluctuación de pérdida y distorsión de los caracteres transmitidos, los cuales no pueden ser procesados en la tarjeta controladora Arbotix-M.

3.6 Consumo de energía del prototipo.

Para el cálculo del consumo total de corriente y potencia del prototipo implementado, se consideró el consumo individual registrado por el fabricante de cada uno de los elementos que lo integran, los que se detallan en la tabla 15-3.

Tabla 15-3: Consumo de potencia del prototipo a plena carga.

| Elemento | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) |
|-----------------------------|--------------|---------------|--------------|
| Servomotor Dynamixel Ax-12A | 11,1 | 0,9 | 9,99 |
| Robocontroller Arbotix-M | 5 | 0,04 | 0,20 |
| Módulo Xbee | 3,3 | 0,03 | 0,099 |
| Buzzer | 5 | 0,02 | 0,1 |
| | TOTAL | 0.99 | 10,39 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Mediante el análisis de consumo de cada elemento de la tabla 15-3 se obtuvo como resultado que el consumo total del sistema es de 10,39 W de potencia y 0.99 A de corriente. En base a estos resultados se realizó la elección de la batería que alimenta el prototipo, siendo seleccionada una batería tipo LiPo de 11,1V a 1000 mA la cual satisface los requerimientos propuestos y se acopla con facilidad dentro del robot sin afectar su estabilidad.

- **Rendimiento de la batería a plena carga.**

Para determinar el tiempo de duración de la batería teóricamente se aplicó la ecuación 3.3.

Ecuación 3-3: Calculo rendimiento de la batería.

$$Cd = \frac{Cb}{Cc} * 0.7$$

Dónde:

Cd: Capacidad de duración en horas

Cb: Capacidad de la batería en miliamperios por hora

Cc: Corriente de carga en miliamperios

0.7: Factor de tolerancia a factores externos

Calculo del rendimiento de la batería:

$$Cd = \frac{1000}{990} * 0.7$$
$$Cd = 0.7 \text{ Horas.}$$

Danto como resultado teóricamente 42 minutos de duración de la batería a plena carga.

Para determinar la capacidad de duración de la batería durante el funcionamiento del prototipo se realizó la tabla 16-3, con ayuda de un cronometro y considerando que el límite teórico de descarga en voltaje será los 10 V determinados en un capítulo anteriores.

Tabla 16-3: Duración de la batería a plena carga.

| Prueba | Tiempo (min) |
|-----------------|--------------|
| 1 | 38,63 |
| 2 | 40,12 |
| 3 | 37,94 |
| Promedio | 38,896 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2016.

De este análisis se obtiene que el tiempo de duración de la batería a plena carga, funcionando el prototipo, es de aproximadamente 39 minutos, valor que cumple con los requerimientos establecidos para esta investigación.

- **Rendimiento de la batería en reposo.**

Para determinar la capacidad teórica de duración de la batería cuando el prototipo se encuentra en reposo se aplicó la ecuación 3-3, considerando que los servomotores en reposo tienen un consumo de 0,05A.

$$Cd = \frac{1000}{140} * 0.7$$
$$Cd = 5 \text{ Horas.}$$

Para determinar la capacidad real de duración de la batería en reposo se midió, con un cronometro, el tiempo de descarga, de la prueba se establece que esta dura 10 minutos. En base a este se calculó el tiempo que tardaría en disminuir el voltaje hasta su límite permitido, considerando una cargada completa de 12,6 V, Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 17-3., que refleja que el tiempo de descarga de la batería con el sistema en reposo será alrededor de 5 horas con 17 minutos

Tabla 17-3: Duración de la batería a plena carga.

| Prueba | Voltaje descargado en 30 minutos | Tiempo de descarga en minutos |
|--------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0,52 V | 5,20 |
| 2 | 0,51 | 5,10 |
| 3 | 0,52 | 5,20 |
| | Promedio | 5,17 |

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2016.

3.7 Grado de aceptación y beneficio del prototipo.

Una vez concluidas las pruebas de funcionamiento del prototipo, se realizaron pruebas para medir el grado de aceptación en los niños que acuden al área de terapia de lenguaje del Hospital General, cuya actividad se muestran en la figura 6-3.



Figura 6-3: Interacción del robot con los niños.

Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Luego de ser aplicado durante 5 días en procesos de terapias, se aplicaron encuestas a 23 niños y los padres que los acompañan, conjuntamente con el personal terapeuta. Como resultado se obtiene que:

- **Terapeuta:**

Se realizaron dos preguntas destinadas a la persona encargada del área de Terapia de lenguaje, las mismas que se encuentran a continuación.

Pregunta 1: ¿El robot motivo al niño para que realice una mejor pronunciación de las palabras?

Se contabilizo que 19 niños si fueron motivados por el robot, mientras que 4 niños no mostraron mayor interés en él, obtenido los porcentajes en el gráfico 1-3.

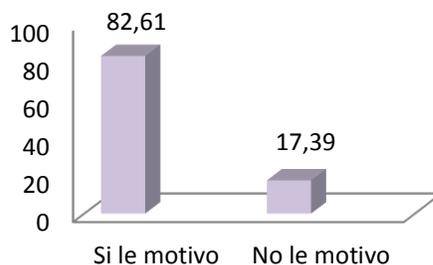


Gráfico 1-3: Respuesta en la primera pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Pregunta 2: ¿Ha mejorado la atención del niño en la realización de las actividades de movilidad de extremidades al realizarlas junto al robot?

Se contabilizo que en 21 niños ha mejorado de la atención durante las actividades de movilidad de sus extremidades, mientras que solo 2 niños no mostraron mayor atención con él, los porcentajes se evidencian en el gráfico 2-3.

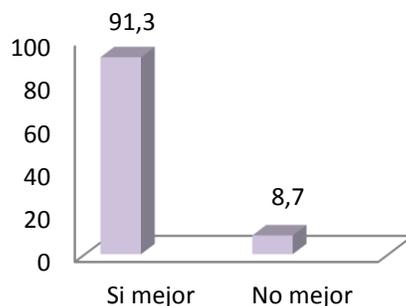


Gráfico 2-3: Respuesta en la segunda pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

- **Niño**

Para el niño se formularon dos preguntas de la encuesta, las mimas que se muestran a continuación.

Pregunta 3: ¿Te gusto el robot mostrado?

Se contabilizo que a 22 niños les gusto el robot cuando fue mostrado, mientras que un solo niño tuvo miedo al verlo y no quiso tocarlo, obtenido los porcentajes en el gráfico 3-3.



Gráfico 3-3: Respuesta en la tercera pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Pregunta 4: ¿Te gustó jugar con el robot durante la terapia?

Se contabilizo que 23 niños respondieron que sí, es decir a todos los niños les gusto jugar con el robot al momento de realizar su terapia, obtenido el 100% tal como se muestra en el gráfico 4-3.

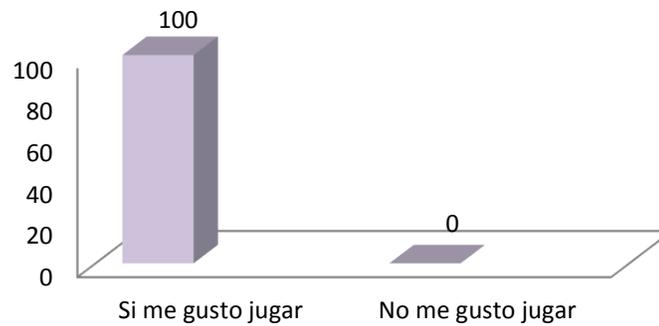


Gráfico 4-3: Respuesta en la cuarta pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

- **Padre**

Para el padre de familia se realizaron dos preguntas, las que se muestran a continuación.

Pregunta 5: ¿Qué le parece a usted el robot implementado para el Hospital General Docente con una herramienta tecnológica como apoyo para las terapias de su niño?

Se contabilizo que 20 padres opinaron que es bueno que se tenga esta herramienta tecnológica para las terapias de sus niños y 3 padres no mostraron mayor agrado con ello, obtenido los porcentajes mostrados en el gráfico 5-3.

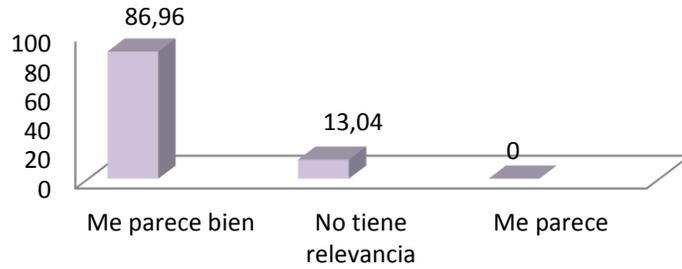


Gráfico 5-3: Respuesta en la quinta pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Pregunta 6: ¿El niño acude con mayor agrado a las terapias desde que tiene un robot para jugar en ellas?

Se contabilizó que 22 niños acuden con mayor agrado a las terapias debido al robot y que solo un niño no ha mostrado diferencia alguna al asistir a sus terapias, obtenido los porcentajes mostrados en el gráfico 6-3.

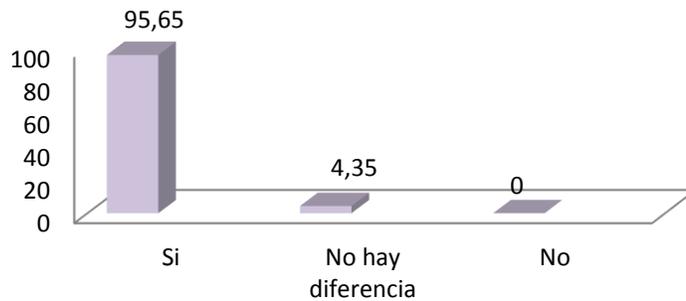


Gráfico 6-3: Respuesta en la sexta pregunta.
Realizado por: Moncayo Karen; Estrada Gabriela; 2017.

Después de analizar las encuestas, se puede concluir que prototipo implementado presenta aceptación en los tres grupos investigados, en especial en los niños que toman como juego las actividades de terapia, buscan mejorar la pronunciación y movilidad de sus extremidades con la finalidad de poder jugar con el robot. Para la terapeuta es un gran apoyo tener una herramienta tecnológica al alcance ayudándole para que los niños se distraigan en las sesiones y que estas no sean monótonas.

CONCLUSIONES

- Se implementó un robot mini-humanoide con la capacidad de simular los movimientos del teleoperador en tiempo real, utilizando comunicación inalámbrica mediante modulos Xbee, para uso como herramienta de apoyo en el área de terapia de lenguaje del Hospital Provincial General Docente Riobamba.
- Se comprobó mediante diferentes pruebas que el prototipo presenta una similitud del 95% respecto a los movimientos del usuario, debido a varios factores externos, pero se garantiza su correcto funcionamiento en condiciones adecuadas.
- La comunicación inalámbrica posee un alcance de hasta 17 metros en los que se envían y reciben de datos puros, libres de ruido e interferencias.
- El prototipo tuvo una aceptación del 98% con los niños que acuden a las terapias en el Hospital General, brindando así la ayuda requerida del terapeuta para motivar al paciente en sus diferentes actividades.
- La programación implementada en este proyecto consta de funciones brindando claridad y orden en el código tanto en el Software Arduino y LabVIEW.
- El proyecto puede ser escalable gracias al tipo de comunicación que posee, por lo que varios robots pueden trabajar en serie simplemente interconectando los Xbee receptores a un mismo Xbee emisor.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable que se estudie la posibilidad de incrementar la capacidad de duración de las baterías que alimentan el sistema para ampliar el tiempo de funcionamiento.
- Incorporar el estudio el centro de gravedad del robot en proyectos futuros para lograr la mejor movilidad de las extremidades inferiores y que el grado de similitud en sus movimientos sea mucho mayor.
- Realizar un algoritmo basado en redes neuronales para el control del robot mejorando así la estabilidad del prototipo.
- Añadir rutinas predefinidas en el prototipo para que este pueda cumplir con su funcionamiento autónomo o teleoperado según los requerimientos del usuario.
- Añadir un encendido del robot mediante radio control, de esta forma el robot podrá ser operado en su totalidad de forma remota.

BIBLIOGRAFÍA

1. **3D CAD, PORTAL.** SolidWorks. [En línea]
[Citado el: 16 de 02 de 2017.]
<http://www.3dcadportal.com/solid-works.html>.
2. **ARDUINO.cl.** ¿Qué es Arduino? [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://arduino.cl/que-es-arduino/>.
3. **ARDUINODHLICS.** Arduino: Tecnología para todos. [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://arduinodhtics.weebly.com/iquestqueacute-es.html>.
4. **BALAGUER, Carlos, et al.,** *Fundamentos de Robotica.* MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007. Vol. II.
5. **BARRIERE, Eulálea, RODRÍGUEZ, José y SÁNCHEZ, Ricard.** Robots Industriales. [En línea] 02 de 2014.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/industr/Robots%20Industriales.htm.
6. **CASALS, Alicia.** Robotica y personas con discapacidad. [En línea]
[Citado el: 01 de 09 de 2015.]
<https://campus.usal.es/~inico/investigacion/jornadas/jornada2/comun/c26.html>.
7. **CONADIS.** Información estadística de personas con discapacidad. [En línea] 02 de 2017.
[Citado el: 2 de 03 de 2017.]
<http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>.
8. **CHAN, Margaret y ZOELLICK, Robert.** INFORME MUNDIAL. [En línea] 2011.
[Citado el: 20 de 02 de 2017.]
http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/summary_es.pdf?ua=1.
9. **DEFINICION.DE.** Definición de Bluetooth. [En línea] 2009.
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://definicion.de/bluetooth/>.

10. **Don Bosco, Universidad.** Introducción a Matlab y LabVIEW. [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/biomedica-ingenieria/procesamiento-de-senales-biomedicas/2015/ii/guia-1.pdf>.
11. **EQUIPOS Y LABORATORIO.** Baterías (Electricidad). [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3134.
12. **ESI2.** Tutorial Labview. [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://www.esi2.us.es/~asun/LCPC06/TutorialLabview.pdf>.
13. **ESMARCITY.** Robots humanoides en terapias para niños con autismo. [En línea] 31 de 10 de 2014.
[Citado el: 02 de 09 de 2015.]
<https://www.esmartcity.es/noticias/robots-humanoides-en-terapias-para-ninos-con-autismo>.
14. **GONZALES, Carolina.** Microprocesadores y Microcontroladores . [En línea] 07 de 2013.
[Citado el: 11 de 01 de 2017.]
https://www.academia.edu/9869924/309696_MICROPROCESADORES_Y_MICROCONTROLADORES_INDICE_DE_CONTENIDO.
15. **HERNÁNDEZ, Aura.** Robots, apoyo para autismo. [En línea] 16 de 05 de 2015.
[Citado el: 02 de 09 de 2015.]
<http://www.excelsior.com.mx/hacker/2015/05/16/1024427>.
16. **ILBAY LLANGARÍ, Luis Guido.** Evaluación de algoritmos de tracking 3d para la simulación de un brazo robótico, mediante Kinect. [En línea] 06 de 06 de 2015.
(tesis).(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
[Citado el: 12 de 01 de 2017.]
Disponible en:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4402/1/108T0124.docx.pdf>.
17. **JOLLY, Adrien.** LabVIEW, TestStand, LabWindows/CVI. [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<http://www.ajolly.com.mx/es/desarrollo-consulta-sistema-supervisor-control-prueba-medida/19-LabVIEW-que-es.html>.
18. **JUNE, Violet.** Fundamentos de Robotica. [En línea] 30 de 04 de 2014.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]

https://www.academia.edu/8104337/Fundamentos_de_Robotica.

19. **KOZIMA, Hideki.** Keepon. [En línea] 2007.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.roboticspot.com/robots.php?id=78>

20. **LIZARRAGA, Raúl.** Sistemas y medios de comunicación "Ensayo". [blog]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
Disponible en:
<http://raullizarraga.blogspot.com/2012/11/sistemas-y-medios-de-comunicacion-ensayo.html>.

21. **MÁRQUEZ, Cristina.** Willow triunfó en la Semana de la Tecnología. [En línea] 27 de 06 de 2015.
[Citado el: 02 de 09 de 2015.]
<http://www.elcomercio.com/tendencias/willow-semanatecnologia-esepoch-robot-autismo.html>.

22. **MÁRQUEZ, Jaime.** Matlab vs LabVIEW. [blog]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
Disponible en:
<http://fisicosonline.blogspot.com/2008/10/matlab-vs-labview.html>.

23. **MICROSOFT.** Developing with Kinect for Windows. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect/develop>.

24. **MOGOLLÁNTORAL, MÁRQUEZ, DÍAZ y LÓPEZ, ACEVES.** Imitación de movimientos humanos en un robot humanoide Bioloid. [En línea] 18 de 10 de 2013.
[Citado el: 13 de 01 de 2017.]
<http://amca.mx/memorias/amca2013/articulos/0070.pdf>.

25. **MSc. SOTOMAYOR, Nelson.** Robotica Industrial. [En línea] 09 de 2009.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://es.calameo.com/read/002648042ce58dc42ac65>.

26. **ÑACATO ESTRELLA, Diego Ramiro.** Diseño e implementación de un sistema de teleoperación para controlar un robot humanoide mediante un sensor Kinect. [En línea] 16 de 12 de 2014. (tesis).(Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
[Citado el: 10 de 01 de 2017.]
Disponible en:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3622/1/108T0106.pdf>.

27. **OBREGON, Melany.** Visión del Kinect. [En línea] 24 de 04 de 2014.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<https://malenyabrego.wordpress.com/category/kinect/vision-del-kinect/>.
28. **OMS.** Discapacidad y salud. [En línea] 11 de 2016.
[Citado el: 20 de 02 de 2017.]
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs352/es/>.
29. **OPORTUNIDAD.** Tipos de discapacidad que existen. [En línea] 25 de 03 de 2010.
[Citado el: 20 de 02 de 2017.]
<https://es.slideshare.net/Oportunidad/tipos-de-discapacidad>.
30. **PFEIFFER, Sammy.** Guiado gestual de un robot humanoide. [En línea] 2011.
(tesis).(Ingeniería) Universidad Politécnica de Cataluña
[Citado el: 13 de 01 de 2017.]
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12454/74118.pdf>.
31. **Ph.D., MURRAY R. SPIEGEL.** *Teoria y Problemas de Probabilidad y Estadística.* México :
L;tográfica Ingramex, 1977.
32. **ROB, GRUP 13E.** Robots Industriales. [En línea] 02 de 2014.
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/industr/Robots%20Industriales.htm.
33. **RO-BOTICA.** Actuadores de muy altas prestaciones en red para robots. [En línea] [Citado el:
14 de 12 de 2016.] <http://ro-botica.com/tienda/ROBOTIS-DYNAMIXEL>.
34. **ROBOTICA.BLOGSPOT.** Robotica. [blog]
[Citado el: 01 de 09 de 2015.]
Disponible en:
<http://robotiica.blogspot.com/2007/10/historia-de-la-robotica.html>.
35. **SAMANIEGO RIERA, Franklin Eduardo. 2013.** “Algoritmos de visión para plataformas mini-humanoide de competición con capacidades aumentadas”. [En línea] 10 de 04 de 2013.
(tesis).(Maestría) Universidad Carlos III de Madrid
[Citado el: 12 de 01 de 2017.] Disponible en:
<http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1176/2/T-SENESCYT-000304%20P.pdf>.

36. **SIGNIFICADOS.** Qué es Wifi. [En línea]
[Citado el: 15 de 12 de 2016.]
<https://www.significados.com/wifi/>.

37. **Start, ROBOTIS PREMIUM Quik..** *Easy assembly and program dowload.* Geumcheon-gu :
ROBOTIS Co., 2014. Brazos.

38. **TROSSENROBOTICS:a.** ArbotiX-M Robocontroller:a. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/p/arbotix-robot-controller.aspx>.

39. **TROSSENROBOTICS:b.** Bioloid GP Humanoid Robot Kit. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/p/bioloid-gp-humanoid-robot.aspx>.

40. **TROSSENROBOTICS:c.** Bioloid Premium Robot Kit. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/p/bioloid-premium-robot-kit.aspx>.

41. **TROSSENROBOTICS:d.** CM-700 Robotis Servo Controller. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/store/p/6410-CM-700-Robotis-Servo-Controller.aspx>.

42. **TROSSENROBOTICS:e.** Darwin-Mini. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/darwin-mini>.

43. **TROSSENROBOTICS:f.** Dynamixel AX-12A Robot Actuator. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ax-12-robot-actuator.aspx>.

44. **TROSSENROBOTICS:g.** Dynamixel AX-18A Robot Actuator. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ax-18A-robot-actuator.aspx>.

45. **TROSSENROBOTICS:h.** Dynamixel XL-320 Robot Actuator. [En línea]
[Citado el: 14 de 12 de 2016.]
<http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-xl-320-robot-actuator>.

ANEXOS

Anexo A: Manual de usuario



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES

INDUSTRIALES

**“INTERACCIÓN DE UN ROBOT MINI-HUMANOIDE TELEOPERADO COMO HERRAMIENTA
DE APOYO PARA TERAPIA DE LENGUAJE EN NIÑOS DEL HOSPITAL PROVINCIAL
GENERAL DOCENTE RIOBAMBA”**

MANUAL DE USUARIO

AUTORAS: MONCAYO VALLEJO KAREN JANINE

ESTRADA COLCHA KATHERINE GABRIELA

TUTOR: ING. EDWIN VINICIO ALTAMIRANO SANTILLÁN

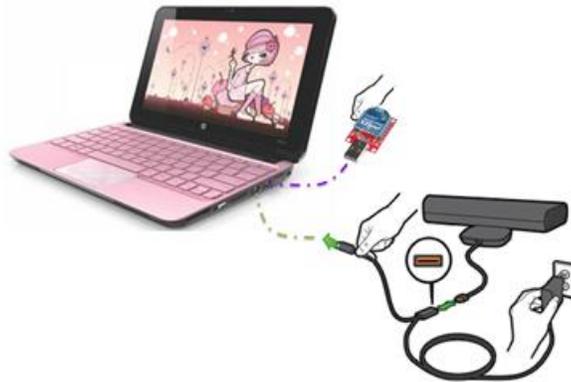
Riobamba – Ecuador

2017

INTRODUCCIÓN

El presente manual muestra los pasos que se deben seguir para el correcto uso del prototipo como herramienta de apoyo en el Área de Terapia de Lenguaje del Hospital General Docente de Riobamba, el robot mini-humanoide teleoperado, el mismo tendrá la capacidad de simular los movimientos del terapeuta para interactuar con los niños durante cierto tiempo en la sesión.

PASOS A SEGUIR PARA UTILIZAR EL ROBOT TELEOPERADO CON EL KINECT.



- 1 Para conectar el Kinect al PC se debe introducir el USB a un puerto del computador, y el cable de alimentación a una toma corriente. El sensor debe estar colocado a 1.5 metros del piso y a una distancia de entre 1.5 y 2m en frente del usuario. Se debe considerar un espacio libre y con una luz moderada, es decir que no haya mucha incidencia de rayos solares.
- 2 Insertar la placa Xbee Explorer Dongle con módulo el xbee en un puerto libre del computador, este módulo Xbee será el encargado de transmitir los datos obtenidos por el Kinect y previamente procesados hacia la placa controladora del robot.



Tesis_Humanoid

Para abrir programa simplemente se debe, dar doble click en el icono mostrado a la izquierda el cual se encuentra en el escritorio del computador ya que el programa se trata de un archivo ejecutable, una vez que el programa se abra se observará el entorno que se muestra a continuación:



Seleccionar el puerto para que el Xbee transmita los datos, en el PC que se instalo los programas el puerto predefinido para el dispositivo es el COM 11 mostrado en la imagen de la izquierda, cabe indicar de que el número de puerto puede variar de acuerdo al equipo que se esté corriendo el proyecto.



El botón que se muestra sirve para terminar la ejecución del programa, es decir cuando se quiera dejar de replicar los movimientos en el robot.



Una vez encendido el Kinect se debe verificar que en el programa aparezca el punto azul que se muestra en la figura, el cual indica que el Kinect puede empezar a tomar los datos del usuario



Verificar que la batería del robot esté conectada al mismo, caso contrario proceder a conectarla como se muestra en la imagen, se tiene un zócalo el cual permite conectarla de una sola forma evitando posibles cortocircuitos por descuido si se conecta de forma equivocada.



Colocar el robot en un área lisa, verificar que el robot este en una posición firme y que los cables de conexión de cada extremidad tengan libertad para moverse sin ningún problema, es decir que no estén enredados o enganchados.



Una vez que el robot este firme, se procede a encenderlo, para hacerlo se debe cambiar de posición el interruptor que se encuentra en la parte posterior del mismo.



Colocarse frente al Kinect a una distancia de entre 1,5 y 2 metros dependiendo de la estatura del usuario para que pueda tomar todos sus puntos como se muestra en la figura.



Observar si en la pantalla del PC se muestra el esqueleto en la misma posición en que se encuentra el usuario, una vez verificado esto se procede a realizar los movimientos que desee replicar en el robot.

MOVILIDAD DEL ROBOT.

Para la movilidad del robot se debe considerar, que es un prototipo y sus movimientos no serán tan precisos como los que realiza una persona, por ello se deben tener en cuenta algunas recomendaciones.

- Los movimientos que realice el terapeuta deben ser movimientos muy puntuales, sin mayor grado de complejidad.
- Los movimientos deben ser realizados despacio, es decir no realizar movimientos bruscos que puedan afectar la estabilidad del robot.
- Para las extremidades inferiores, se consideraron los rangos de movimiento en los que el robot mantiene su estabilidad, es decir no realizará movimientos más allá de sus limitaciones,

por ello se recomienda realizar movimientos delicados y por cortos momentos para que el robot no sufra daños.

- Tener en cuenta que se tienen unos 5 milisegundos de retardo entre cada movimiento debido al procesamiento interno que se debe realizar para llegar a realizar los mismos movimientos que el terapeuta.
- Los movimientos que realice el usuario deben ser en el mismo punto ya que el robot no realiza desplazamientos en sus diferentes ejes.
- Estar atentos al sonido de alerta de la batería, para que esta no sufra ningún daño, es recomendable recárgala para cada sesión.

CONEXIONES INTERNAS DEL ROBOT.



Las conexiones de cada elemento se detallan a continuación:

- El módulo Xbee receptor se conecta a los terminales del Xbee Socket ubicado en la parte inferior de la placa Arbotix-M, para permitir la recepción de datos.
- Para la alimentación de la placa se utilizó la batería, los terminales GND de la batería y de la placa Arbotix-M se conectaron entre si y el terminal positivo de la batería fue conectado a un switch, para permitir o interrumpir el paso de energía hacia el terminal Vcc de la placa.
- La placa de expansión para servomotores dynamixel fue conectada por medio de un cable al puerto destinado estos actuadores en la placa Arbotix-M.

- Los servomotores fueron conectados como se detalló en la tabla 2-1, teniendo los terminales en cada una de las extremidades, los servomotores pertenecientes a los ID 1,2,7 y 8 son conectados individualmente a la placa de expansión por medio de los cables propios de dynamixel.
- Los terminales de la bocina que funciona como alarma cuando el nivel de alimentación está en su límite inferior, se conectaron el positivo al terminal digital 0 de la placa Arbotix y el negativo al GND.

PASOS A SEGUIR PARA RECARGAR LA BATERIA DEL ROBOT.



- 1 Conectar la fuente al cable de poder y este a la toma corriente más cercano. Una vez conectada la fuente de poder, insertar el plug en el cargador de baterías.
- 2 Una vez desconectada la batería del robot, se debe conectar el zócalo que tiene tres cables al cargador de baterías, al igual este zócalo en el cargador tiene una sola forma de entrada evitando que se conecte en sentido contrario y se puedan producir accidentes.



El foco rojo como se muestra en la figura se encenderá lo que quiere decir que la batería está siendo cargada y se mantendrá así hasta que este cargada en su totalidad y se encienda el foco verde, en ese momento se puede desconectar todo y volver a colocar la batería en el robot.

Anexo B: Manual Robocontroller Arbotix-M

Arbotix-M Hardware Overview

DC Power Jack

There are two DC jacks that you can use to power your Arbotix. Both of these jacks are electrically equivalent, so you may power your Arbotix through either jack.

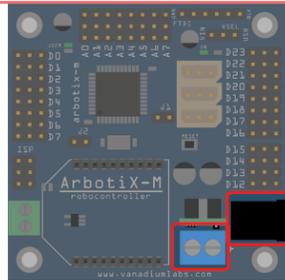
1) The blue screw-terminal port will accept two wires - the ground-wire will be on the left screw terminal and the positive-voltage-wire will be on the right (as indicated by the + symbol)

2) The black barrel jack will accept a standard 2.1*5.5mm DC jack. This can be very convenient for plugging in SMPS power supplies to your Arbotix M.

The power that is fed through these jacks will power:

- 1) Any DYNAMIXEL servos connected to the Arbotix M
- 2) The on board power regulator (which will in turn supply a regulated 5v to the rest of the board)

The Arbotix-M will work with input voltages from 7-30V, but is most commonly used at 11-12V, as most DYNAMIXELs work safely at this voltage.



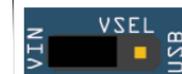
Power Selection Jumper

The Power Selection Jumper will allow you to choose how to power the Arbotix's microcontroller circuitry.

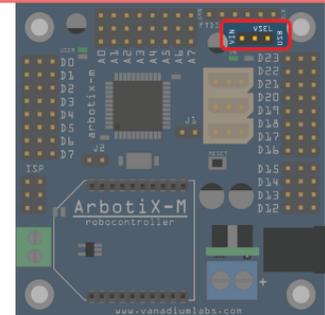
Connecting the jumper between the middle pin and 'VIN' pin will power the microcontroller from the 5v regulator, which is in turn powered through the main DC power terminal/jack.

By connecting the jumper between the middle pin and the 'USB' Pin, the microcontroller will be powered from the 5v supply from the FTDI cable - in most cases this is 5v from your computer's USB connector. The voltage regulator/DC Jacks will be bypassed.

Power ATMEGA644p through VIN through regulator



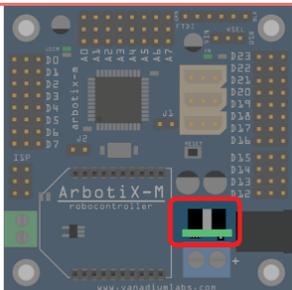
Power ATMEGA644p through USB/FTDI



Regulator

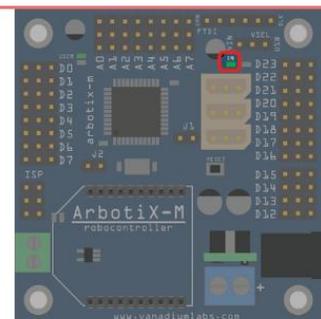
The 5V regulator will step down the input voltage from VIN to 5V for the ATMEGA644p and most attached sensors and devices. It is normal for the regulator to get hot to the touch.

The regulator on the Arbotix-M can work with inputs from 7v to 30v. On the output side, the regulator can supply 1.5A at 5V.



Power LED

This LED will turn on when the ATMEGA644 is receiving 5v power, either through USB or the regulator.



Anexo C: Manual Servomotores Dynamixel AX-12A

DYNAMIXEL AX-12 ROBOTIS

1-2. Main Specifications

| | AX-12 | |
|----------------------------------|-------|--------|
| Weight (g) | 55 | |
| Gear Reduction Ratio | 1/254 | |
| Input Voltage (V) | at 7V | at 10V |
| Final Max Holding Torque(kgf.cm) | 12 | 16.5 |
| Sec/60degree | 0.269 | 0.196 |

| | |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Resolution | 0.35° |
| Operating Angle | 300°, Endless Turn |
| Voltage | 7V~10V (Recommended voltage: 9.6V) |
| Max. Current | 900mA |
| Operate Temperature | -5°C ~ +85°C |
| Command Signal | Digital Packet |
| Protocol Type | Half duplex Asynchronous Serial Communication (8bit,1stop,No Parity) |
| Link (Physical) | TTL Level Multi Drop (daisy chain type Connector) |
| ID | 254 ID (0-253) |
| Communication Speed | 7343bps ~ 1 Mbps |
| Feedback | Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc. |
| Material | Engineering Plastic |

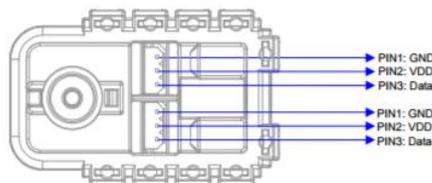
2-2 . Connector Assembly

Assemble the connectors as shown below. Attach the wires to the terminals using the correct crimping tool. If you do not have access to a crimping tool, solder the terminals to the wires to ensure that they do not become loose during operation.



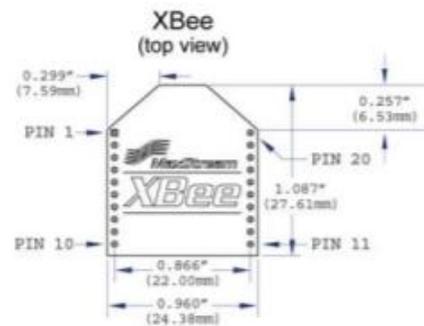
2-3. Dynamixel Wiring

Pin Assignment The connector pin assignments are as the following. The two connectors on the Dynamixel are connected pin to pin, thus the AX-12 can be operated with only one connector attached.



Anexo D: Datasheet módulo Xbee s1.

| SPECIFICATIONS | Legacy XBee® S1 802.15.4 |
|----------------------------------|-------------------------------------------|
| PERFORMANCE | |
| RF DATA RATE | 250 kbps |
| INDOR/URBAN RANGE | 100 ft (30 m) |
| OUTDOOR/RF LINE-OF-SIGHT RANGE | 300 ft (100 m) |
| TRANSMIT POWER | 1 mW (+0 dBm) |
| RECEIVER SENSITIVITY (1% PER) | -92 dBm |
| DIGI HARDWARE | S1 |
| TRANSCIEVER CHIPSET | Freescle MC13212 |
| FEATURES | |
| SERIAL DATA INTERFACE | 3.3V CMOS UART |
| CONFIGURATION METHOD | API or AT Commands, local or over-the-air |
| FREQUENCY BAND | 2.4 GHz |
| INTERFERENCE IMMUNITY | DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) |
| SERIAL DATA RATE | 1200 bps - 250 kbps |
| ADC INPUTS | (6) 10-bit ADC inputs |
| DIGITAL I/O | 8 |
| ANTENNA OPTIONS | Chip, Wire Whip, U.F.L., & RPSMA |
| NETWORKING & SECURITY | |
| ENCRYPTION | 128-bit AES |
| RELIABLE PACKET DELIVERY | Retries/Acknowledgments |
| IDS AND CHANNELS | PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 Channels |
| POWER REQUIREMENTS | |
| SUPPLY VOLTAGE | 2.8 - 3.4VDC |
| TRANSMIT CURRENT | 45 mA @ 3.3VDC |
| RECEIVE CURRENT | 50 mA @ 3.3VDC |
| POWER-DOWN CURRENT | <10 uA @ 25° C |
| REGULATORY APPROVALS | |
| FCC (USA) | OUR-XBEE |
| IC (CANADA) | 4214A-XBEE |
| ETSI (EUROPE) | Yes |
| C-TICK AUSTRALIA | Yes |
| TELEC (JAPAN) | Yes |



FUENTE: https://www.digi.com/pdf/ds_xbeemultipointmodules.pdf

Anexo E: Pruebas de movimiento de las extremidades de robot vs las del teleopredador



Anexo F: Interacción del robot con los niños del Área de Terapia de Lenguaje.



Anexo G: Procedimiento para encontrar la cinemática inversa del robot.

Procedimiento de la cinemática inversa del brazo Método Geométrico.

1. Para hallar el ángulo q_2 , correspondiente al movimiento vertical del hombro, se realizó un esquema independiente como se mostró en la figura 2-10.

Utilizando el triángulo que forma q_2 con P_Y , P_X y r se puede deducir:

$$\tan q_2 = \frac{P_Y}{P_X} \tag{Ecu 1}$$

$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_Y}{P_X}\right) \tag{Ecu 2}$$

2. Para hallar el ángulo q_4 y q_6 , correspondiente al movimiento horizontal del hombro y al movimiento del codo respectivamente.

El valor de r se lo encuentra utilizando el esquema geométrico de la figura 2-12, por medio del triángulo rectángulo que forma q_2 con los catetos P_X , P_Y y la hipotenusa r .

$$r^2 = P_X^2 + P_Y^2 \tag{Ecu 3}$$

$$r = \pm\sqrt{P_X^2 + P_Y^2} \tag{Ecu 4}$$

De igual forma el valor L se obtuvo del triángulo rectángulo que conforman los catetos: r , P_Z y la hipotenusa L de la figura 2-11.a.

$$L^2 = r^2 + P_Z^2 \tag{Ecu 5}$$

Para el ángulo φ se utilizó la Ley de los cosenos como se muestra en el triángulo de la figura 1.

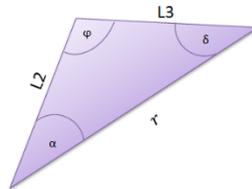


Figura 1: Ley de cosenos ángulo q_6 .

Fuente: Autoras

De la aplicación de la ley de los cosenos se obtiene:

$$L^2 = L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos \varphi \tag{Ecu 6}$$

Remplazando el valor de L^2 con la Ecu .5 y el valor de r^2 con la ecuación 3:

$$r^2 + P_Z^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \varphi \tag{Ecu 7}$$

$$P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \varphi \tag{Ecu 8}$$

$$\cos \varphi = \frac{L_2^2 + L_3^2 - P_X^2 - P_Y^2 - P_Z^2}{2L_2L_3} \tag{Ecu 9}$$

El ángulo q_6 se obtiene del teorema de diferencia de ángulos:

$$\cos \varphi = \cos(\pi - q_6) \quad \text{Ecu 10}$$

$$\cos \varphi = \cos(\pi) \cos(q_6) + \sin(\pi) \sin(q_6) \quad \text{Ecu 11}$$

$$\cos \varphi = (-1) \cos(q_6) - (0) \sin(q_6) \quad \text{Ecu 12}$$

$$\cos \varphi = (-1) \cos(q_6) \quad \text{Ecu 13}$$

$$\cos q_6 = (-1) \cos \varphi \quad \text{Ecu 14}$$

Remplazando el valor de $\cos \varphi$ de la ecuación 9:

$$\cos q_6 = (-1) \left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - P_X^2 - P_Y^2 - P_Z^2}{2L_2L_3} \right) \quad \text{Ecu 15}$$

$$\cos q_6 = \frac{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \quad \text{Ecu 16}$$

Aplicando la función arco tangente se obtiene:

$$\cos^2 q_6 + \sin^2 q_6 = 1 \quad \text{Ecu 17}$$

$$\sin q_6 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_6} \quad \text{Ecu 18}$$

$$\tan q_6 = \frac{\sin q_6}{\cos q_6} \quad \text{Ecu 19}$$

$$q_6 = \text{arctan} \left(\frac{\sin q_6}{\cos q_6} \right) \quad \text{Ecu 20}$$

$$q_6 = \text{arctan} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_6}}{\cos q_6} \right) \quad \text{Ecu 21}$$

Con la ayuda de la configuración codo abajo de la figura 2-11.b se calcula el ángulo q_4 .

$$q_4 = \beta - \alpha \quad \text{Ecu 22}$$

El ángulo β se lo obtiene mediante la aplicación del triángulo rectángulo que forma β con los catetos P_z , r y la hipotenusa L .

$$\tan \beta = \frac{P_z}{r} \quad \text{Ecu 23}$$

Remplazando el valor de r con la ecuación 4:

$$\tan \beta = \frac{P_z}{\pm \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}} \quad \text{Ecu 24}$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}} \right) \quad \text{Ecu 25}$$

Para el cálculo del ángulo α se tomó como referencia el triángulo rectángulo que se muestra en la figura 2:

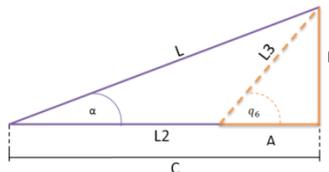


Figura 2: Triángulo para el análisis de α .

Fuente: Autoras

Para encontrar los valores de A, B y C, con respecto al ángulo q_6 .

$$\sin q_6 = \frac{B}{L_3} \quad \text{Ecu 26} \quad \cos q_6 = \frac{A}{L_3} \quad \text{Ecu 28}$$

$$B = L_3 \sin q_6 \quad \text{Ecu 27} \quad A = L_3 \cos q_6 \quad \text{Ecu 29}$$

$$C = L_2 + A \quad \text{Ecu 30}$$

$$C = L_2 + L_3 \cos q_6 \quad \text{Ecu 31}$$

Para encontrar el ángulo α :

$$\tan \alpha = \frac{B}{C} \quad \text{Ecu 3.32}$$

$$\tan \alpha = \frac{L_3 \sin q_6}{L_2 + L_3 \cos q_6} \quad \text{Ecu 3.33}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_3 \sin q_6}{L_2 + L_3 \cos q_6}\right) \quad \text{Ecu 3.34}$$

Reemplazando los ángulos β y α de la ecuación 22, se obtiene el valor de q_4 , para los ángulos que deben adoptar las articulaciones y llegar al punto deseado.

$$q_4 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L_3 \sin q_6}{L_2 + L_3 \cos q_6}\right) \quad \text{Ecu 35}$$

Método de Matrices de Transformación Homogéneas por Denavit Hartenberg.

$${}^{i-1}A_i = T(z, \vartheta_i)T(0,0, d_i)T(a_i, 0,0)T(x, \alpha_i) \quad \text{Ecu 3.36}$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} c\vartheta_i & -s\vartheta_i & 0 & 0 \\ s\vartheta_i & c\vartheta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Resolviendo el producto de matrices de transformación T , obteniéndose la siguiente matriz de transformación ${}^{i-1}A_i$.

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} c\vartheta_i & -c\alpha_i s\vartheta_i & s\alpha_i s\vartheta_i & a_i c\vartheta_i \\ s\vartheta_i & c\alpha_i c\vartheta_i & -s\alpha_i c\vartheta_i & a_i s\vartheta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Para encontrar la matriz de transformación T del brazo de robot, se realizó el producto de matrices homogéneas con la ayuda del software Matlab, obteniéndose la siguiente matriz.

$$\begin{pmatrix} c_2 c_4 & s_2 c_4 & s_4 & -L_2 \\ -c_2 s_4 & -s_2 s_4 & c_4 & 0 \\ s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & L_3 c_6 \\ s_6 & c_6 & 0 & L_3 s_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Procedimiento para encontrar los ángulos de las articulaciones.

Una vez obtenida la matriz final de Denavit Hartenberg, se utiliza para hallar lo ángulos de cada articulación del brazo del robot; para lo cual se siguen los siguientes pasos:

1. Plantear el sistema de ecuaciones de la matriz final.

$$c_2 c_4 P_x + s_2 c_4 P_y + s_4 P_z - L_2 = L_3 c_6 \quad \text{Ecu 37}$$

$$-c_2 s_4 P_x - s_2 s_4 P_y + c_4 P_z = L_3 s_6 \quad \text{Ecu 38}$$

$$s_2 P_x - c_2 P_y = 0 \quad \text{Ecu 39}$$

2. Hallar el ángulo q_2 despejando de la ecuación 39.

$$s_2 P_x = c_2 P_y \quad \text{Ecu 40}$$

$$\frac{s_2}{c_2} = \frac{P_y}{P_x} \quad \text{Ecu 41}$$

$$\tan q_2 = \frac{P_y}{P_x} \quad \text{Ecu 42}$$

$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad \text{Ecu}$$

43

3. Encontrar el ángulo q_4 , utilizando las ecuaciones 37 y 38 y despejar los valores de P_x , P_y , y P_z .

$$-s_4(c_2 P_x + s_2 P_y) + c_4 P_z = L_3 s_6 \quad \text{Ecu 44}$$

$$c_4(c_2 P_x + s_2 P_y) + s_4 P_z = L_3 c_6 + L_2 \quad \text{Ecu 45}$$

Para reducir la ecuación se sustituye el término semejante por una variable, así será más fácil resolverla:

$$(c_2 P_x + s_2 P_y) = A \quad \text{Ecu 49}$$

Dividiendo la ecuación 47 ara la ecuación 48 y reemplazando el término semejante se tiene:

$$\frac{-s_4 A + c_4 P_z}{c_4 A + s_4 P_z} = \frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2} \quad \text{Ecu 50}$$

Basándose en la Ley de Tangentes de la ecuación 51, se realiza un proceso matemático para llegar a una ecuación que cumpla con las mismas características:

$$\tan(B - C) = \frac{\tan B - \tan C}{1 + \tan B \tan C} \quad \text{Ecu 51}$$

$$\frac{\frac{c_4 P_z - s_4 A}{A c_4} - \frac{s_4 A}{A c_4}}{\frac{c_4 A}{A c_4} + \frac{s_4 P_z}{A c_4}} = \frac{\frac{L_3 s_6}{A c_4}}{\frac{L_3 c_6 + L_2}{A c_4}} \quad \text{Ecu 52}$$

$$\frac{\frac{P_z}{A} - \tan q_4}{1 + \frac{P_z}{A} \tan q_4} = \frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2} \quad \text{Ecu 53}$$

Considerando la ecuación 54:

$$\frac{P_z}{A} = \tan \varphi \quad \text{Ecu 54}$$

Entonces se tiene la ecuación 55 que cumple con las mismas características que la ecuación 51

$$\frac{\tan \varphi - \tan q_4}{1 + \tan \varphi \tan q_4} = \frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2} \quad \text{Ecu 55}$$

$$\tan(\varphi - q_4) = \frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2} \quad \text{Ecu 56}$$

Despejando q_4 de la ecuación 56:

$$\varphi - q_4 = \arctan\left(\frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2}\right) \quad \text{Ecu 57}$$

$$q_4 = \varphi - \arctan\left(\frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2}\right) \quad \text{Ecu 58}$$

De la ecuación 3.54 despejamos el ángulo φ en la ecuación 59:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{P_z}{A}\right) \quad \text{Ecu 59}$$

Para halla el valor de A elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación 49.

$$A^2 = (c_2 P_x + s_2 P_y)^2 \quad \text{Ecu 60}$$

$$A^2 = c_2^2 P_x^2 + 2c_2 s_2 P_x P_y + s_2^2 P_y^2 \quad \text{Ecu 61}$$

$$A^2 = c_2^2 P_x^2 + c_2 s_2 P_x P_y + c_2 s_2 P_x P_y + s_2^2 P_y^2 \quad \text{Ecu 62}$$

De la ecuación 43 despejamos tanto el valor de P_x y P_y

$$s_2 P_x = c_2 P_y \quad \text{Ecu 63} \quad c_2 P_y = s_2 P_x \quad \text{Ecu 65}$$

$$P_x = \frac{c_2 P_y}{s_2} \quad \text{Ecu 64} \quad P_y = \frac{s_2 P_x}{c_2} \quad \text{Ecu 66}$$

Reemplazando en la ecuación 62 los valores de P_x de la ecuación 64 para el segundo término y P_y de la ecuación 66 para el tercer término:

$$A^2 = c_2^2 P_x^2 + \frac{c_2 s_2 P_x s_2 P_x}{c_2} + \frac{c_2 s_2 P_y c_2 P_y}{s_2} + s_2^2 P_y^2 \quad \text{Ecu 67}$$

$$A^2 = c_2^2 P_x^2 + s_2^2 P_x^2 + c_2^2 P_y^2 + s_2^2 P_y^2 \quad \text{Ecu 68}$$

$$A^2 = P_x^2 (c_2^2 + s_2^2) + P_y^2 (c_2^2 + s_2^2) \quad \text{Ecu 69}$$

$$A^2 = P_x^2 + P_y^2 \quad \text{Ecu 70}$$

$$A = \pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad \text{Ecu 71}$$

Reemplazando el valor de A en la ecuación 59 y el valor de φ en la ecuación 58 se encontró el ángulo q_4 .

$$\varphi = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad \text{Ecu 72}$$

$$q_4 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L_3 s_6}{L_3 c_6 + L_2}\right) \quad \text{Ecu 73}$$

4. Hallar el ángulo q_6 , a partir de las ecuaciones 47 y 48 elevando al cuadrado ambos miembros de cada una de las ecuaciones.

$$(c_4(c_2 P_x + s_2 P_y) + s_4 P_z)^2 = (L_3 c_6 + L_2)^2 \quad \text{Ecu 74}$$

$$c_4^2 (c_2 P_x + s_2 P_y)^2 + 2c_4 s_4 P_z (c_2 P_x + s_2 P_y) + s_4^2 P_z^2 = L_3^2 c_6^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \quad \text{Ecu 75}$$

$$(-s_4(c_2 P_x + s_2 P_y) + c_4 P_z)^2 = (L_3 s_6)^2 \quad \text{Ecu 76}$$

$$s_4^2(c_2 P_x + s_2 P_y)^2 - 2c_4 s_4 P_z(c_2 P_x + s_2 P_y) + c_4^2 P_z^2 = L_3^2 s_6^2 \quad \text{Ecu 77}$$

Sumar las ecuaciones 75 y 77.

$$\begin{aligned} c_4^2(c_2 P_x + s_2 P_y)^2 + 2c_4 s_4 P_z(c_2 P_x + s_2 P_y) + s_4^2 P_z^2 &= L_3^2 c_6^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \\ s_4^2(c_2 P_x + s_2 P_y)^2 - 2c_4 s_4 P_z(c_2 P_x + s_2 P_y) + c_4^2 P_z^2 &= L_3^2 s_6^2 \\ (c_4^2 + s_4^2)(c_2 P_x + s_2 P_y)^2 + (c_4^2 + s_4^2) P_z^2 &= (c_6^2 + s_6^2)L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \end{aligned} \quad \text{Ecu 78}$$

Considerando que la identidad trigonométrica:

$$c_4^2 + s_4^2 = 1 \quad \text{Ecu 79}$$

La ecuación 78 quedaría de la siguiente forma:

$$(c_2 P_x + s_2 P_y)^2 + P_z^2 = L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \quad \text{Ecu 80}$$

$$c_2^2 P_x^2 + 2c_2 s_2 P_x P_y + s_2^2 P_y^2 + P_z^2 = L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \quad \text{Ecu 81}$$

A partir de la ecuación 42, elevando al cuadrado ambos miembros tenemos:

$$(s_2 P_x - c_2 P_y)^2 = (0)^2 \quad \text{Ecu 82}$$

$$s_2^2 P_x^2 - 2s_2 c_2 P_x P_y + c_2^2 P_y^2 = 0 \quad \text{Ecu 83}$$

Sumar las ecuaciones 81 y 83.

$$\begin{aligned} c_2^2 P_x^2 + 2c_2 s_2 P_x P_y + s_2^2 P_y^2 + P_z^2 &= L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \\ s_2^2 P_x^2 - 2s_2 c_2 P_x P_y + c_2^2 P_y^2 &= 0 \\ (c_2^2 + s_2^2) P_x^2 + (s_2^2 + c_2^2) P_y^2 + P_z^2 &= L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \end{aligned} \quad \text{Ecu 84}$$

Tomando la misma consideración trigonométrica de la ecuación 79 se tiene:

$$P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 = L_3^2 + 2L_2 L_3 c_6 + L_2^2 \quad \text{Ecu 85}$$

Despejando q_6 :

$$2L_2 L_3 c_6 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_3^2 - L_2^2 \quad \text{Ecu 86}$$

$$\cos q_6 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_3^2 - L_2^2}{2L_2 L_3} \quad \text{Ecu 87}$$

$$q_6 = \arccos\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - L_3^2 - L_2^2}{2L_2 L_3}\right) \quad \text{Ecu 88}$$

Al igual que en el método anterior es recomendable trabajar con arco tangentes en lugar de arco senos, para no tener problemas con los signos.

$$q_6 = \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{1-\cos^2 q_6}}{\cos q_6}\right) \quad \text{Ecu 89}$$

Procedimiento de la cinemática inversa de la pierna

1. Hallar el ángulo q_{12} correspondiente al movimiento del muslo.

El ángulo q_{12} está compuesto por la suma de los ángulos α y β como se muestra en la figura 2-22.

Para encontrar el ángulo α , se tomó en cuenta las coordenadas de la rodilla obtenidas previamente por del kinect, se utilizó el triángulo rectángulo que forma α con los catetos A, B y la hipotenusa H.

$$\tan \alpha = \frac{A}{B} \quad \text{Ecu 88}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A}{B}\right) \quad \text{Ecu 89}$$

Para hallar β se utilizó la Ley de los cosenos, como se muestra en el triángulo de la figura 3.

$$H = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{Ecu 90}$$

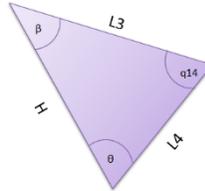


Figura 3: Ley de cosenos.

Fuente: Autoras

$$L_4^2 = L_3^2 + H^2 - 2L_3H \cos \beta \quad \text{Ecu 91}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_3^2 + H^2 - L_4^2}{2L_3H}\right) \quad \text{Ecu 92}$$

Sumar los ángulos α y β para encontrar q_{12} .

$$q_{12} = \alpha + \beta \quad \text{Ecu 93}$$

$$q_{12} = \arctan\left(\frac{A}{B}\right) + \arccos\left(\frac{L_3^2 + H^2 - L_4^2}{2L_3H}\right) \quad \text{Ecu 94}$$

2. Hallar el ángulo q_{14} correspondiente al movimiento de la rodilla.

Se realizó el mismo proceso que para halla β , utilizando la misma figura

$$H^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2L_3L_4 \cos q_{14} \quad \text{Ecu 95}$$

$$q_{14} = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - H^2}{2L_3L_4}\right) \quad \text{Ecu 96}$$

3. Hallar el ángulo q_{16} correspondiente al movimiento vertical del tobillo (tilt).

El ángulo q_{16} está compuesto por la suma de los ángulos θ , φ , γ como se mostró en la figura 2.19.

Para hallar θ se utilizó el triángulo de la figura 3.

$$180 = \theta + \beta + q_{14} \quad \text{Ecu 97}$$

$$\theta = 180 - \beta - q_{14} \quad \text{Ecu 98}$$

Para hallar el ángulo φ de la figura 2.19, se utilizó el triángulo rectángulo que forma φ con los catetos A, B y la hipotenusa H.

$$\cos \varphi = \frac{A}{H} \quad \text{Ecu 99}$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{A}{H}\right) \quad \text{Ecu 100}$$

Para encontrar el ángulo γ de la figura 2.19, se utilizó el triángulo rectángulo que forma γ con los catetos A_{fy} , A_{fx} y la hipotenusa L_6 .

$$X = B + A_{fx} \quad \text{Ecu 101} \quad Y = A - A_{fy} \quad \text{Ecu 103}$$

$$A_{fx} = X - B \quad \text{Ecu 102} \quad A_{fy} = A - Y \quad \text{Ecu 104}$$

$$A_{fy} = L_6 \cos \gamma \quad \text{Ecu 105}$$

$$\cos \gamma = \frac{A_{fy}}{L_6} \quad \text{Ecu 106}$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{A_{fy}}{L_6}\right) \quad \text{Ecu 107}$$

Sumar los ángulos θ , φ , γ para encontrar q_{16} .

$$q_{16} = \theta + \varphi + \gamma \quad \text{Ecu 107}$$

$$q_{16} = 180 - \beta - q_{14} + \arccos\left(\frac{A}{H}\right) + \arccos\left(\frac{A_{fx}}{L_6}\right) \quad \text{Ecu 108}$$

$$q_{16} = 180 - \arccos\left(\frac{L_3^2 + H^2 - L_4^2}{2L_3H}\right) - \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - H^2}{2L_3L_4}\right) + \arccos\left(\frac{A}{H}\right) + \arccos\left(\frac{A_{fx}}{L_6}\right) \quad \text{Ecu 109}$$

Calculó el ángulo de cabeceo.

$$A_{fx} = L_6 \cos \vartheta \quad \text{Ecu 110}$$

$$\cos \vartheta = \frac{A_{fx}}{L_6} \quad \text{Ecu 111}$$

$$\vartheta = \arccos\left(\frac{A_{fx}}{L_6}\right)$$

Anexo H: Código del Programa en Arduino.

Se detalla las partes más importantes y los procedimientos que se deben seguir para obtener los datos.

```
#include <ax12.h>
String readString;
char A=0,B=0;
int q1=0,q2=0,q3=0,q4=0,q5=0,q6=0,p=0;
int bat=2;
const int SERVOCOUNT = 2;

void setup() {
  pinMode (bat, OUTPUT);
  Serial.begin(38400);
  delay(100);
  //Indicar la pocisiones iniciales del robot }

void loop() {
  float voltage = (ax12GetRegister (1, AX_PRESENT_VOLTAGE, 1)) / 10.0;
  if (voltage < 10.0) {
    digitalWrite(bat,HIGH); }
  while (Serial.available()) {
    delay(10);
    if (Serial.available() >0) {
      while (Serial.available() {
        Serial.println(readString);
        A=Serial.read();
        //Se debe desconcatenar la cadena para obtener por searado las letra y los digitos de cada
        servomotor y comapararlos
        if (A=='a'){
          //Obtener el valor de q1
          SetPosition(1,q1); }
          if (A=='b') {
            //Obtener el valor de q3
            SetPosition(3,q3); }
            if (A=='c') {
              //Obtener el valor de q5
              SetPosition(5,q5); }
              if (A=='d') {
                //Obtener el valor de q2
                SetPosition(2,q2); }
                if (A=='e') {
                  //Obtener el valor de q4
                  SetPosition(4,q4); }
```

```

    if (A=='f') {
//Obtener el valor de q6
    SetPosition(6,q6);}
    if (B=='g')
//Obtener el valor de p que determina la posicion de las piernas
    if(p==111) {
// Piernas rectas
    p=0;}
    else
    if(p==112) {
// Pierna derecha recta hacia adelante
    p=0;}
    else
    if(p==113) {
// Pierna derecha rodilla hacia adelante
    p=0;}
    else
    if(p==114) {
// Pierna derecha recta hacia atras
    p=0;}
    else
    if(p==115) {
// Pierna derecha rodilla hacia atrás
    p=0;}
    else
    if(p==121) {
// Pierna izquierda recta hacia adelante
    p=0;}
    else
    if(p==131) {
// Pierna izquierda rodilla hacia adelante
    p=0;}
    else
    if(p==141) {
// Pierna izquierda recta hacia atras
    p=0;}
    else
    if(p==151) {
// Pierna izquierda rodilla hacia atrás
    p=0;}
    }
    readString="";}
}
}
}
}

```

Anexo I: Licencia Estudiantil Original LabVIEW

Certificate of Ownership

Save This Document

You need this serial number to license your software and receive upgrades and technical support. You will continue to use the serial number with future versions of this National Instruments software, so please save this document. Reproduction of this certificate is illegal and strictly prohibited.

Certificat de propriété

Conservez ce document

Vous aurez besoin de ce numéro de série pour obtenir une licence pour votre logiciel, recevoir des mises à jour et bénéficier du support technique. Comme vous utiliserez ce numéro de série pour les futures versions de ce logiciel National Instruments, veuillez le conserver en lieu sûr. La reproduction de ce certificat est illégale et strictement interdite.

Eigentumsnachweis

Bewahren Sie dieses Dokument sorgfältig auf

Die beiliegende Seriennummer wird zum Anfordern von Upgrades, für Anfragen an den technischen Support und zur Lizenzierung Ihrer Software benötigt. Die Seriennummer gilt auch für alle künftigen Versionen Ihrer Software. Bewahren Sie dieses Dokument daher sorgfältig auf. Das Kopieren dieses Nachweises ist gesetzeswidrig und ausdrücklich untersagt.

Certificate of Ownership

このドキュメントは紛失しないように大切に保管してください

ソフトウェアのライセンスを照会される際、またアップグレードや技術サポートをご利用になる際にこのシリアル番号が必要になります。また、将来のソフトウェアのバージョンアップでも、このシリアル番号が必要になるため、このドキュメントを大切に保管してください。この証明書の複製は法律で禁止されています。

소유권 증명서

고객님의 편의를 위해 이 문서를 반드시 보관하십시오.

이 문서에 포함된 시리얼 번호는 제품의 정품인증, 업그레이드, 기술지원 요청시에 필요합니다. 이 시리얼 번호는 다음 버전의 National Instruments 소프트웨어에도 적용되므로, 이 문서를 보관하십시오. 이 문서를 복제하는 것은 불법이며, 엄격히 금지되어 있습니다.

所有权证书

请妥善保管证书

获取软件许可、软件更新和技术支持时，需提供证书上的序列号。该序列号将可适用于 National Instruments 软件后续的版本更新。请妥善保管，严格禁止任何复制所有权证书的非法行为。

LABVIEW STUDENT EDITION, WIN AND OS X,
SOFTWARE SUITE

Part Number:



779252-3501

Serial Number:



M78X46059



341002H-01

1001

©2011 National Instruments. All rights reserved. National Instruments, NI, and ni are trademarks of National Instruments. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. Printed in the United States of America.



Anexo J: Programación en LabVIEW

PANEL FRONTAL

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES
TRABAJO DE TITULACIÓN



PRESENTADO POR:

- KATHERINE G. ESTRADA C.
- KAREN J. MONCAYO V.



COMUNICACIÓN

Escoger el Puerto Terminar

Cadena de datos

COORDENADAS OBTENIDAS
EXTREMIDADES SUPERIORES

| IZQUIERDA | | | DERECHA | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| X | Y | Z | X | Y | Z |
| FOMERO | | | | | |
| Xhi | Yhi | Zhi | Xhd | Yhd | Zhd |
| <input type="text" value="0"/> |
| CODO | | | | | |
| Xci | Yci | Zci | Xcd | Ycd | Zcd |
| <input type="text" value="0"/> |
| MUÑECA | | | | | |
| Xmi | Ymi | Zmi | Xmd | Ymd | Zmd |
| <input type="text" value="0"/> |

EXTREMIDADES INFERIORES

| X | | | Y | | | Z | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|--|--|
| CADERA | | | | | | | | |
| Xcadi | Ycadi | Zcadi | Xcadd | Ycadd | Zcadd | | | |
| <input type="text" value="0"/> | | | |
| RODILLA | | | | | | | | |
| Xri | Yri | Zri | Xrd | Yrd | Zrd | | | |
| <input type="text" value="0"/> | | | |
| TOBILLO | | | | | | | | |
| Xti | Yti | Zti | Xtd | Ytd | Ztd | | | |
| <input type="text" value="0"/> | | | |

ANGULOS OBTENIDOS

| IZQUIERDA | | | DERECHA | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| BRAZOS | | | | | |
| Q2 | Q4 | Q6 | Q1 | Q3 | Q5 |
| <input type="text" value="0"/> |
| PIERNAS | | | | | |
| Q8 | Q12 | Q14 | Q7 | Q11 | Q13 |
| <input type="text" value="0"/> |
| Q16 | | Q18 | Q15 | | Q17 |
| <input type="text" value="0"/> | | <input type="text" value="0"/> | <input type="text" value="0"/> | | <input type="text" value="0"/> |



DIAGRAMA DE BLOQUES

