



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

“Diseño e implementación de un sistema de comunicación de un robot manipulador de 4GDL mediante el sensor Kinect y telerobótica, para personas con discapacidad física.”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor:

ANDRÉS RICARDO AUQUILLA AYORA

Director:

Ing. HUGO MARCELO TORRES SALAMEA Ph.D.

CUENCA, ECUADOR

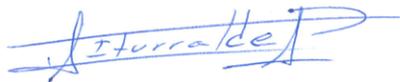
2019

Diseño e Implementación de un Sistema de Comunicación de un Robot Manipular de 4GDL mediante el Sensor Kinect y Telerobótica, para Personas con Discapacidad Física.

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño e implementación de un sistema telerobótico con comunicación inalámbrica, basado en Bluetooth y Wifi, para el control de un robot manipulador mediante el sensor Kinect dirigido a personas con discapacidad física. Este documento presenta diversas investigaciones relacionadas con la telerobótica, aplicaciones del sensor Kinect y diferentes sistemas de comunicación utilizados en la robótica. Además, describe la metodología para el desarrollo del hardware y software, al mismo tiempo se da a conocer los lenguajes de programación y sus procesos. Finalmente, se exponen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de los sistemas de comunicación.

Palabras clave: Kinect, Wifi, Bluetooth, Robot manipulador, Telerobótica.



Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Coordinador de Carrera



Ing. Hugo Torres Salamea. Ph.D
Director de Trabajo de Titulación



Andrés Ricardo Auquilla Ayora.
Autor

Design and Implementation of a Communication System for a 4GDL Handling Robot using the Kinect sensor and Telerobotic for People with Physical Disabilities.

ABSTRACT

This article describes the design and implementation of a telerobotic system with wireless communication based on Bluetooth and Wifi to control a manipulator robot using the Kinect sensor, aimed at people with physical disabilities. This document presents diverse investigations related to telerobotics, Kinect sensor applications and different communication systems used in robotics. In addition, it describes the methodology for the development of hardware, software, programming languages and their processes. Finally, the tests carried out and the results obtained from the communication systems were exposed.

Keywords: Kinect, Wifi, Bluetooth, Handling Robot, Telerobotics.



Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Faculty Coordinator



Ing. Hugo Torres Salamea. Ph.D
Thesis Director



Andrés Ricardo Auquilla Ayora.
Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Diseño e Implementación de un Sistema de Comunicación de un Robot Manipulador de 4 GDL mediante el Sensor Kinect y Telerobótica, para Personas con Discapacidad Física.

Andrés Ricardo Auquilla Ayora
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay, UDA
Cuenca, Ecuador
andresraa@es.uazuay.edu.ec

Resumen- El presente artículo describe el diseño e implementación de un sistema telerobótico con comunicación inalámbrica, basado en Bluetooth y Wifi, para el control de un robot manipulador mediante el sensor Kinect dirigido a personas con discapacidad física. Este documento presenta diversas investigaciones relacionadas con la telerobótica, aplicaciones del sensor Kinect y diferentes sistemas de comunicación utilizados en la robótica. Además, describe la metodología para el desarrollo del hardware y software, al mismo tiempo se da a conocer los lenguajes de programación y sus procesos. Finalmente, se exponen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de los sistemas de comunicación.

Keywords- Kinect, Wifi, Bluetooth, Robot manipulador, Telerobótica.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la robótica ha permitido desarrollar aplicaciones en diferentes campos científicos, especialmente en la medicina, la industria, la exploración y cada vez es mayor su incidencia en la vida del ser humano. Sin embargo, dentro del campo laboral industrial es permanente la exclusión a personas con discapacidades físicas, debido a la dificultad del obrero para manipular maquinaria pesada en una fábrica. Otro de los problemas a nivel industrial es la exposición del obrero a lugares contaminados y peligrosos, allí es donde el robot desarrollará su trabajo, de darse esta situación provocaría daños al operador y mucho más a una persona con discapacidad física ya que son espacios donde se necesitan movilidad y fuerza física [1].

De acuerdo a lo establecido en la ley del CONADIS, Artículo 47, sobre la Inclusión Laboral “La o el empleador público o privado que cuente con un número mínimo de veinticinco (25) trabajadores está obligado a contratar, un mínimo de cuatro por ciento (4%) de personas con discapacidad, procurando los principios de equidad de género y diversidad de discapacidades”. En el Azuay, del 100% de personas con discapacidad, el 49,06% están registradas con discapacidad física, como se indica en la Fig. 1 [2].

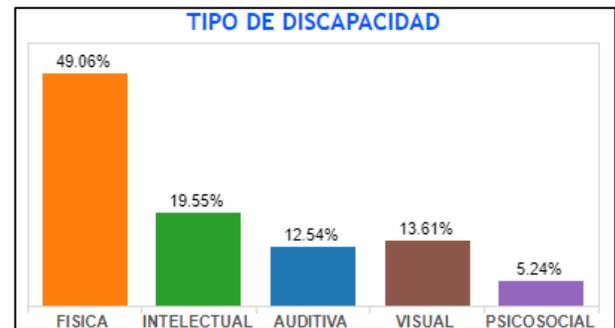


Fig. 1. Tipo de discapacidad en el Azuay [2].

Por este motivo, es importante realizar un sistema de comunicación inalámbrico donde una persona discapacitada pueda controlar un robot manipulador a distancia en ambientes peligrosos sin poner en riesgo su integridad física.

La motivación para la elaboración de este proyecto es ayudar a las personas con escasa movilidad en sus extremidades inferiores al momento de realizar el manejo de maquinaria o la realización de algún proceso dentro de la industria. Gracias al robot controlado por el sensor Kinect la persona podrá manipular y manejar mediante los gestos de las manos de forma fácil las tareas deseadas. Además, este proyecto se fundamentará en la telerobótica debido a que se trabajará con una comunicación inalámbrica, protegiendo de esta manera al operario y aislándolo de ambientes peligrosos. Esto facilitará el trabajo en la industria debido a que el robot podrá ser utilizado en diferentes aplicaciones en el ámbito industrial, como también ser utilizado por una persona que sufre discapacidad física [3][4].

La elaboración del sistema de comunicación inalámbrica para el robot manipulador se centra en las personas con discapacidad permitiéndoles realizar tareas a distancia mediante un computador, como también para acceder a lugares contaminados y peligrosos. Uno de los métodos para solucionar los diversos problemas que se tiene al momento de incorporar a personas con discapacidad física al campo laboral, es detectar los gestos de la mano para controlar la trayectoria del robot utilizando un sensor Kinect, además gracias a la incorporación de la telerobótica le permitirá trabajar a distancia.

La implementación de este sistema se fundamenta en el artículo científico titulado: “Robot controlado por gestos de la mano para personas con discapacidades físicas”, presentado en la conferencia ANDESCON 2018 el cual describe un sistema de comunicación por cable entre el robot y el sensor Kinect [5].

A. *Estado de arte.*

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en la investigación de diferentes artículos científicos donde se ha utilizado el sensor Kinect para manipular diferentes tipos de robots, como también en la investigación sobre las comunicaciones implementadas en la telerobótica y sus aplicaciones.

En la Universidad de Santiago de Chile, un grupo de estudiantes desarrolló un software con el seguimiento de los movimientos de las articulaciones mediante el sensor Kinect para controlar un brazo robótico, luego de varias pruebas se logró mejorar el tiempo de respuesta. Además, procesan la información para mejorar el funcionamiento del robot con los datos provenientes del sensor Kinect [6].

Un proyecto muy importante desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña, ideado por Sammy Pfeiffer, trata sobre el control de las articulaciones de un robot humanoide mediante el sensor Kinect, realiza un estudio completo del movimiento del cuerpo humano utilizando la tecnología del sensor Kinect, lo que ha permitido implementar la cinemática inversa con programación en gráficos 3D y conceptos de geometría y trigonometría [7].

Seyd Islam realizó un estudio sobre un sistema estéreo visión telerobótico para el movimiento de un robot PUMA-560 a distancia mediante una red LAN (Local Area Network), en el cual se realiza un análisis del problema más crítico que se tiene en estos sistemas que es el retraso de la comunicación, produciendo inestabilidad en la teleoperación. Este retraso se minimiza al implementar un modelo de sistema de visión estéreo, adaptando conceptos de realidad aumentada (AR) lo que facilita la seguridad de las tareas. El sistema utiliza Visual C# y directX9 [8].

Saad Hafiane realizó un sistema de reconocimiento de gestos de la mano en 3D para controlar un robot NAO mediante telerobótica ejecutando diferentes tareas complejas como la manipulación de objetos; el proyecto se basa en el estudio del gesto de la mano abierta y mano cerrada para el control del robot utilizando el algoritmo SURF (Speeded up robust features) y OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Se implementa el seguimiento manual como una interfaz de control intuitivo. El robot es teleoperado mediante una conexión TCP y Wifi [9].

Guoliang Zhong construye un robot móvil con un brazo de 6 grados de libertad (GDL) en su parte superior, el mismo que muestra el diseño y modelo cinemático y la cinemática inversa del brazo, basando su interfaz de usuario en realidad virtual y muestra sus movimientos en un entorno virtual 3D. La teleoperación se realiza mediante Wifi para transmitir los datos del computador al robot [10].

Bruno Apolloni presenta un proyecto para el control de un robot utilizando la telerobótica en ambientes hostiles, en el cual se estudia la restricción del tiempo de comunicación mediante redes neuronales, según el cual el robot se encuentra en la Universidad de Ploiesti y la estación base en la Universidad de Milán. Para la transmisión de datos usan un radio módem por su gran alcance, siendo así, la estación de trabajo envía datos al robot e identifica periódicamente el entorno de trabajo [11].

En la universidad Changsha, China, se realizó una investigación basada en los mayores problemas que se tiene al desarrollar sistemas de telerobótica conectados al internet, la investigación trata sobre los protocolos de comunicación, técnica de codificación, soporte del control en tiempo real y el envío de audio y video usando una conexión UDP para controlar un robot 6-HTRT [12].

Lijun Zhao propone un interfaz intuitivo de un robot Baxter de 7 GDL controlado por telerobótica en tiempo real para la implementación de tareas complicadas en un entorno de trabajo incierto de manera eficiente, donde se aplica un método para la construcción de una interfaz entre el maestro y el manipulador que realiza el mapeo del lugar de trabajo y soluciona la redundancia del robot mediante el uso del sensor Kinect. El envío de los datos se da por una conexión UDP entre la computadora y el robot [13].

Kyung/Rok Kim diseña un robot móvil educativo tipo IoT (Internet de las cosas) donde a medida que el robot se mueve en el entorno construido por bloques, el robot virtual se mueve al mismo tiempo debido a que ambos entornos son precisos. Este robot utiliza dos sensores RGB (Red, Green, Blue) y un módulo NFC (Near Field Communication) para la comunicación. El robot es controlado desde el celular mediante comunicación Bluetooth [14].

Akash Singh diseña un robot controlado mediante una aplicación móvil que utiliza comunicación Bluetooth por medio del protocolo UART, el movimiento del robot se realiza según los comandos de la tarjeta Arduino, y es capaz de espiar usando una cámara inalámbrica, en la cual la imagen puede ser visualizada en un Pc mediante una radio antena, el sistema es reprogramable según el proceso implementado [15].

Jeamyung Ryu propone el diseño e implementación de una interfaz para un guante de detección de posición para el control remoto de un robot móvil mediante comunicación Bluetooth. El robot es controlado por el usuario con el guante de forma remota, la dirección depende de la posición de cada dedo de la mano. Los resultados experimentales demuestran que el robot puede ser controlado de forma eficiente por el guante [16].

Xiao Li y Peter Kazanzides desarrollan un método para retirar un parche ubicado en un satélite utilizando telerobótica desde una estación de control en la Tierra. Analizan los retrasos en la comunicación y proponen un sistema en línea con detección de fallas por parte del sistema (en órbita) para realizar un corte sin demora, visualizándolo desde la Tierra. El método se basa en un modelo para predecir la fuerza de corte. Los

experimentos se realizan en la Tierra para demostrar el correcto funcionamiento del sistema [17].

Chunxu Li desarrolla un sistema de seguimiento en línea para controlar el brazo y la cabeza de un robot Nao mediante el sensor Kinect. El sistema se basa en lograr que el robot pueda seguir el movimiento de un usuario humano en tiempo real, esto se logra gracias a la cámara del sensor Kinect y un robot NAO de 5 GDL. La transferencia de datos se realiza mediante una conexión UDP [18].

Luego del análisis de cada investigación y artículo científico se concluye que los sistemas de comunicación más usados para la telerobótica son las comunicaciones inalámbricas, con énfasis en la comunicación Wifi usando protocolo UDP y Bluetooth, debido a que permiten controlar a distancia diferentes tipos de robots.

B. Marco teórico.

• *Introducción.*

La robótica actualmente ha ido reemplazando poco a poco al ser humano especialmente en el campo industrial por sus funciones de manipulación, realización de tareas repetitivas y peligrosas.

C. Tipos de funcionamiento de un robot.

El robot manipulador es un robot industrial, multifuncional, reprogramable y capaz de mover piezas, materiales y desechos a través de varios movimientos siguiendo una trayectoria para el desempeño de varias tareas. Además, es reprogramable y posee varios grados de libertad por su diseño basado en articulaciones [19].

Los principales funcionamientos de un robot son:

Robot programado: es una máquina reprogramable y controlada por un ordenador capaz de realizar diferentes procesos repetitivos y puede sustituir a los humanos, ver Fig. 2 [19].

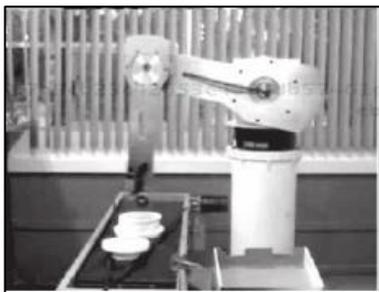


Fig. 2. Robot programable [19].

Robot autónomo: Son capaces de tomar sus propias decisiones sin un operador, se desenvuelven en entornos desconocidos utilizando sensores, por ejemplo: un robot mascota, ver Fig. 3 [19].

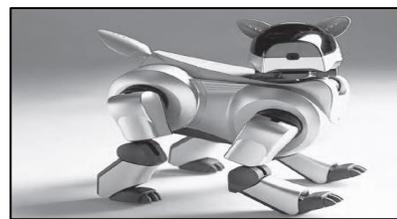


Fig. 3. Autónoma [23].

Teleoperados: Son robots manipulados a distancia y controlados por un operador, la manipulación puede ser mediante comunicaciones inalámbricas. Por ejemplo: Un robot explorador, ver Fig. 4 [23].



Fig. 4. Teleoperado [23].

D. Telerobótica.

La telerobótica actualmente ha desarrollado varias aplicaciones que ayudan al ser humano en trabajos como la exploración submarina y manipulación de desechos tóxicos. Para ello utiliza un sistema de teleoperación a distancia, con esta característica es también empleada en la medicina y sus diferentes ramas, tales como: cirugía, rehabilitación y asistencia a personas con discapacidad [20] [21].

Así mismo, el avance tecnológico de la telerobótica está centrado en diversos sistemas de comunicación debido a la importancia para la transmisión de información entre el operador y el robot, de esta manera aumenta la seguridad del operador al poder utilizar sistemas de vigilancia para la supervisión del proceso [22].

• *Definición.*

Es una parte de la robótica que permite una intervención del operador humano como maestro para la supervisión o teleoperación directa de un robot como esclavo, es decir que la telerobótica es la comunicación inalámbrica entre el operador y el robot, las funciones principales de la telerobótica son el control supervisado, compartido e intercambiado [23].

• *Elementos de la telerobótica.*

Los elementos que constituyen un sistema de telerobótica son:

Operador: es una persona que controla a distancia un robot mediante monitoreo. Sus acciones van desde el control continuo hasta pequeñas intervenciones intermitentes.

Dispositivo teleoperado: Es un robot manipulador o vehículo que trabaja en una zona remota controlado por el operador.

Dispositivos de control: son los dispositivos que permiten la interacción del operador humano con el sistema de teleoperación que permite mover y generar comandos.

Dispositivos de realimentación: Son los dispositivos que informan al operador la ubicación del dispositivo teleoperado. (por ejemplo, cámaras).

Control y canales comunicación: Son los dispositivos que transmiten la información desde el operador al dispositivo teleoperado.

Sensores: Son los dispositivos que recogen la información de la zona donde se encuentra el dispositivo teleoperado [24].

E. Tipos de control utilizados en la telerobótica.

Los controles más usados son:

Unilateral: Se puede realizar el control en una sola dirección, es decir que el manipulador esclavo se mueve cuando el maestro se mueve, pero no al revés.

Bilateral: Existe realimentación de la posición y fuerzas del robot al operador es decir que el sistema convierte la fuerza del esclavo en una fuerza aplicada sobre la mano del operador conocido como realimentación háptica.

Supervisado: El robot esclavo puede realizar algunas tareas de forma automática, mientras el operador supervisa mediante cámaras y envía comandos al robot, como se muestra en la Fig. 5 [24] [25].

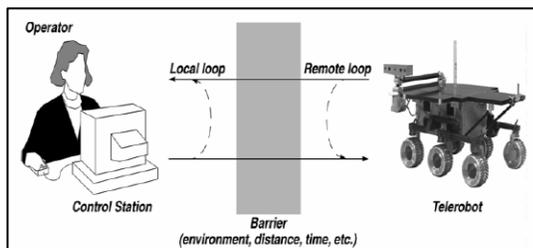


Fig. 5. Control Supervisado [25].

F. Interfaces.

Las interfaces proveen diferentes métodos de control y proporcionan un contacto indirecto entre el operador y el robot. Las interfaces más comunes en la telerobótica son:

Directas: Son las interfaces en donde el operador manipula durante todo el proceso el robot desde controladores de manos como Tablet, joysticks o controles de movimiento, como se ve en la Fig. 6 [25].

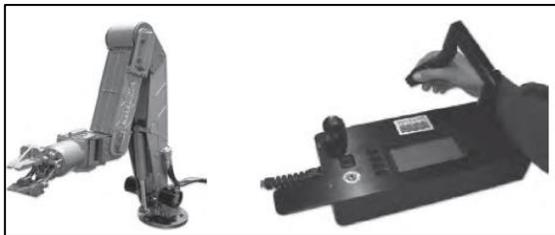


Fig. 6. Interfaz directa [23].

Multimodal o multisensorial: Proporcionan al operador varios métodos de control como actuadores, con realimentación gráfica y visual, como se ve en la Fig. 7.

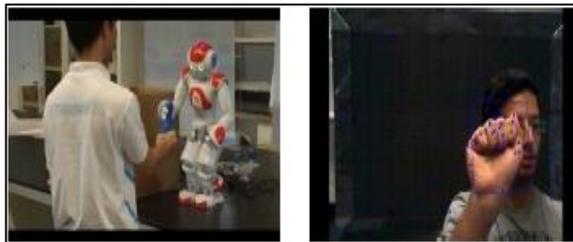


Fig. 7. Interfaz multimodal. [9]

Interfaz para control supervisado: Brinda toda la información para que el maestro sienta la máxima telepresencia utilizando dispositivos hápticos, como se ve en la Fig. 8 [24].



Fig. 8. Interfaz para control supervisado [23].

G. Aplicaciones de la telerobótica.

En el espacio: Se utiliza en la exploración planetaria, construcción y mantenimiento de estaciones espaciales y satélites, como se muestra en la Fig. 9.



Fig. 9. Robot explorador [23].

Industria Nuclear: Son usados para la manipulación de sustancias radiactivas, mantenimiento, descontaminación y ayuda en desastres nucleares sin poner en peligro al ser humano.

Aplicaciones submarinas: Se utiliza para la manipulación de vehículos submarinos para acceder a lugares pequeños y de gran profundidad donde es imposible que acceda una persona, como se muestra en la Fig. 10.



Fig. 10. Robot submarino [24].

Aplicaciones militares: Son utilizados en sistemas de monitorización remota como los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (véase Fig. 11) para la vigilancia, reconocimiento, detección de enemigos, etc.



Fig. 11. UAV [23].

Aplicaciones médicas: En medicina las aplicaciones son múltiples, van desde el desarrollo de prótesis, asistencia a personas discapacitadas, hasta la cirugía asistida por teleoperación, como el robot DaVinci y Zeus 8 (véase Fig. 12) donde el maestro es el cirujano y el esclavo son las pinzas y el paciente, la comunicación se realiza mediante una red LAN usando el protocolo UDP [5] [26].

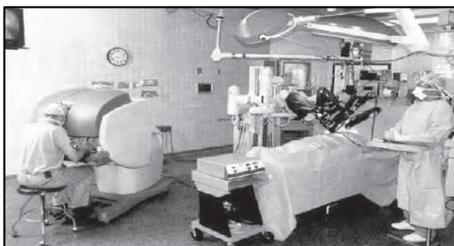


Fig. 12. Robots quirúrgicos [23].

H. Comunicaciones aplicadas a la telerobótica.

Para la transferencia de datos y la información de realimentación entre el maestro y esclavo se debe considerar el ancho de banda, la capacidad de información que transfiere y el tiempo que se demora en llegar la información de un lugar a otro [26].

- **Wireless LAN.**

Uno de los medios de comunicación de fácil instalación y costos bajos más usado en la telerobótica, son las WLAN definido como el conjunto de dispositivos que poseen la capacidad de interactuar y dialogar sin la necesidad de estar conectados por cables.

Existen 3 tipos de comunicaciones inalámbricas usadas en la telerobótica:

- **WLAN Área local.**

Son redes que cubren distancias de 10 a 100 metros, utilizan ondas de radio para llevar la información de un punto a otro sin utilizar un medio físico, permiten el uso de bandas de frecuencia debido a la alta transferencia de datos en tiempo real en cualquier parte del mundo. Para acceder a la red los usuarios deben tener adaptadores inalámbricos que permitan la conexión entre la estación base y el cliente.

Aplicaciones: Las aplicaciones más usadas para este tipo de red se encuentran en el ámbito empresarial, escenario residencial, redes corporativas, acceso público a internet, redes libres, acceso de banda ancha e industriales, donde se controla robots manipuladores mediante Wifi con protocolos TCP/IP y UDP [8] [9] [12] [13].

- **Estándares WLAN:**

El estándar IEEE 802.11: LAN inalámbrica (WLAN) se le conoce como “Wifi” utiliza un sistema por contienda con un proceso de acceso múltiple para acceder a los diferentes medios [26] [27]. Ver en la Tabla I.

TABLA I. ESTÁNDAR WIFI.

Estándar	Velocidad	Frecuencia	Rango	Compatible
IEEE 802.11a	54 Mb/s.	5 GHz	35m	No
IEEE 802.11b	11 Mb/s.	2,4 GHz	35m	No
IEEE 802.11g	54 Mb/s.	2,4 GHz	70m	802.11b
IEEE 802.11n	600 Mb/s.	2,4 GHz o 5GHz	70m	802.11a/b/g
IEEE 802.11ac	1,3 Gb/s.	2,4 GHz y 5GHz	35m	802.11a/n
IEEE 802.11ad	7 Gb/s.	2,4 GHz, 5GHz y 60GHz	10m	802.11a/b/g/n/ac

- **WPAN Área personal.**

Estas redes se basan en el estándar IEEE 802.15 de red de área personal inalámbrica (WPAN) conocidas comúnmente como Bluetooth, cubren distancias de 10 metros como máximo, son usadas para emparejar varios dispositivos portátiles sin utilizar cables y el envío de sus datos no requiere de alta transferencia de información [27].

Aplicaciones: Las aplicaciones de las redes WPAN van desde el control, monitoreo industrial, detección de personas, seguridad pública, medición de humedad en el suelo y automatización del hogar. Sin embargo, dentro de la telerobótica las aplicaciones para el control de robos móviles con tecnologías como Bluetooth, NFC y Zigbee, han sido las más importantes [14] [15] [16].

- **Tipos de redes WPAN.**

Bluetooth: utiliza un estándar IEEE 802.15.1, transfiere datos mediante un enlace de radiofrecuencia a 2,4 GHz con velocidades de hasta 3Mb/s. Tiene un alcance de 10m.

NFC: Near Field Communication, transmite datos entre diferentes dispositivos en frecuencias de 13,56MHz, tiene que estar a menos de 20 centímetros para tener una conexión segura.

Zigbee: utiliza el estándar IEEE 802.15.4, permite habilitar redes inalámbricas para el control y monitorización, es bidireccional de bajo costo energético [27] [28].

- **WWAN Área extensa.**

Las redes WWAN permite realizar conexiones de redes en zonas geográficas distantes. Existe 2 tipos de redes WWAN.

WWAN fijas.

Radioenlace: conecta redes que están separadas geográficamente con bandas como infrarrojos, microondas, láser, etc., utilizando conexión punto a punto o multipunto.

Satélite: Cubren una gran parte del globo terráqueo, poseen un ancho de banda que transmiten a grandes distancias y su mayor inconveniente es el retardo en la señal.

WWAN Móviles.

Móvil: envía y recibe información en movimiento, estas redes poseen gran cantidad de usuarios conectados simultáneamente y utiliza varios servicios. Algunos tipos de redes WWAN móvil son 2G, 3G, 5G.

WIMAX: es estándar IEEE 802.16 conocido como interoperabilidad mundial para acceso por microondas, da acceso a servicios de banda ancha utilizando una topología punto multipunto [27] [28].

Aplicaciones: Las aplicaciones de las redes WWAN se basan en el control de robots a distancia, monitoreo de satélites, la construcción y mantenimiento de estaciones espaciales. Además, tiene amplia gama de aplicaciones en la telerobótica como es el control de robots móviles y espaciales [11] [17].

I. Protocolos usados en la telerobótica.

UDP: Protocolo de datagramas de usuario conocido también como protocolo de máximo esfuerzo, proporciona funciones básicas para la entrega de datos sin revisión de los mismos. UDP es la mejor opción para aplicaciones que puedan tolerar cierta pérdida de datos durante la transmisión a través de la red, pero no admiten retrasos en la transmisión. Es usado en aplicaciones como streaming, audio, video y voz [27].

TCP/IP: Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet recibe y transmite datos mediante internet, administra las conversaciones individuales entre el servidor web y los clientes web, lo cual garantiza que los datos lleguen y no se pierdan durante la transmisión, manteniendo el orden de enviado, tamaño y velocidad.

La diferencia entre el protocolo TCP y UDP es que el primero está orientado a la conexión establecida entre los hosts, garantiza la entrega de los datos mediante el uso de confirmaciones, solo admite la comunicación punto a punto y por tanto es relativamente lento. Mientras que el protocolo UDP es un servicio sin conexión, no garantiza ni confirma la entrega

de los datos, permite una comunicación punto a multipunto y por tanto es más rápido con requisitos de carga pequeños [27].

II. METODOLOGÍA

A. Introducción.

La implementación del sistema telerobótico para el control del manipulador por medio del sensor Kinect está compuesto por dos unidades: maestro y esclavo, además, posee un sistema de comunicación inalámbrico que sirve para controlar el esclavo a distancia.

Los elementos que componen al maestro son:

- La computadora con el programa Visual Studio.
- El sensor Kinect.
- La persona (Operador).

Los elementos que componen al esclavo son:

- Robot manipulador de 4 GDL.
- Arduino MEGA.
- Módulo HC-05 (Bluetooth).
- Módulo ESP8266 (Wifi).
- Cámara.

B. Software.

El software implementado en el sistema con el sensor Kinect puede ser de diferentes lenguajes de programación, dependiendo de la aplicación a realizar. El sensor Kinect V2. dispone de 3 librerías: Microsoft Kinect SDK, OpenNI y Libfreenect. Para el desarrollo del sistema se utiliza Microsoft Kinect SDK.

El programa para el reconocimiento de los gestos se realizó en lenguaje C# en el entorno de desarrollo Visual Studio, el mismo que posee las librerías del sensor Kinect para obtener los diferentes gestos de la mano. Además, desde el mismo entorno de desarrollo se envían los datos de forma inalámbrica. Las características principales de Visual Studio son: Interfaz GUI, orientación a objetos, arrays, flujo de control, tipos de datos y elementos declarados [29].

Para la programación del robot y de cada módulo de comunicación inalámbrica se utiliza el entorno de desarrollo integrado (IDE) de código abierto de la tarjeta Arduino utilizando el lenguaje C++ debido a que permite controlar distintos sensores y diferentes módulos de comunicación al ser de fácil programación, directa y de multi-plataforma [30].

C. Implementación del software Bluetooth.

La implementación del sistema Bluetooth consta del maestro, la comunicación y el esclavo, siendo un control unilateral, como se muestra en la Fig. 13.

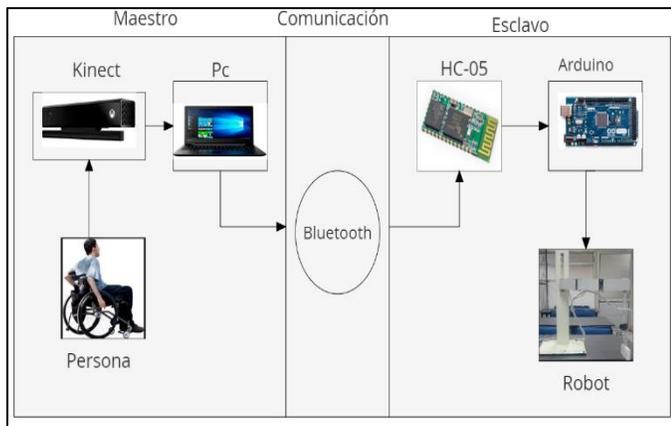


Fig. 13. Esquema Bluetooth.

El flujograma que se utiliza para la comunicación Bluetooth entre maestro y esclavo se puede observar en la Fig. 14. El sistema entra en funcionamiento cuando el maestro envía los datos captados por el sensor Kinect mediante una comunicación Bluetooth al Esclavo (HC-05) y éste a su vez los envía a la tarjeta Arduino para el movimiento del manipulador.

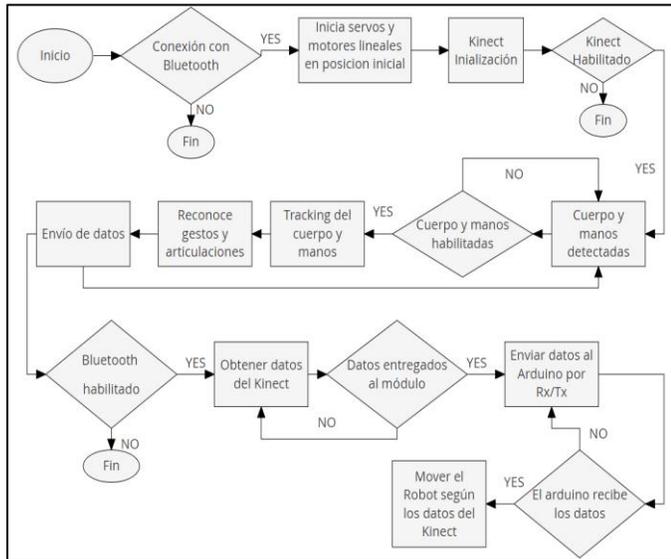


Fig. 14. Flujograma general del sistema de Bluetooth.

- **Maestro.**

Para la implementación de la comunicación Bluetooth en el maestro, es necesario conectar el Pc al módulo HC-05, al mismo que se debe aplicar su contraseña 1234, para su funcionamiento, una vez realizada la conexión se habilita un puerto dedicado al módulo HC-05 (com8) en el Pc, estableciendo así una conexión correcta.

Para conectar el entorno de desarrollo de Visual Studio con el módulo HC-05 se debe elegir el puerto (com8) y la velocidad de transmisión (9600 baudios) a la cual trabaja el módulo.

El código del sistema detecta, primero un cuerpo humano realizando un tracking del mismo, luego, reconoce la posición de las manos y en ese mismo momento el Pc envía los datos con el fin de trama al módulo HC-05.

En la Fig. 15 se muestra el flujograma de Visual Studio para la comunicación mediante el protocolo Bluetooth. El sensor Kinect capta y realiza el tracking de las manos, reconoce los gestos, la posición y los envía al esclavo (HC-05).

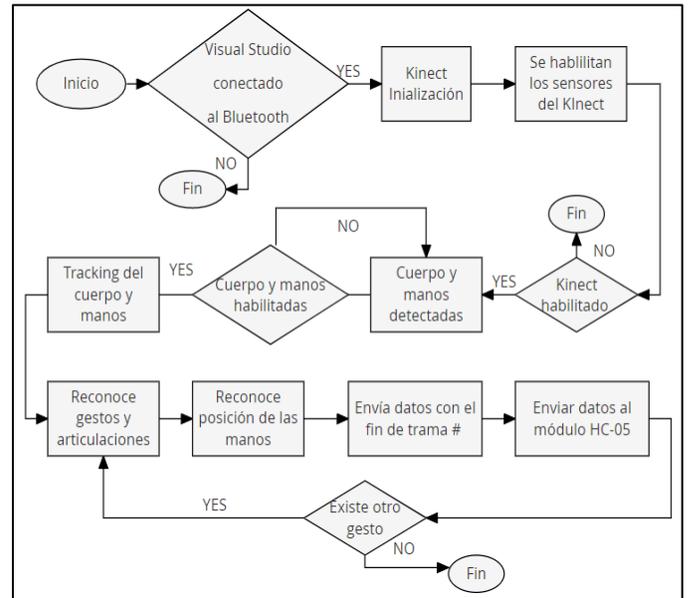


Fig. 15. Proceso de Visual Studio en Bluetooth del Maestro.

El software de Visual Studio reconoce los gestos de la mano abierta, mano cerrada y lazo (dedo índice y medio extendidos y el resto recogidos), como se muestra en la Tabla II. Los cuales permiten realizar el control del robot según la posición de la mano.

TABLA II. GESTOS DE LAS MANOS.

Gesto de la mano	Forma
Mano abierta	
Mano cerrada	
Lazo	

- **Esclavo.**

El software del esclavo funciona cuando recibe los datos del Pc con el fin de trama, gracias a esto el módulo puede detectar los datos, cuando estos llegan al módulo HC-05 elimina el último elemento o fin de trama como se muestra en la Fig. 16 y se envían por comunicación serial a la tarjeta Arduino y este a su vez mueve el robot según el dato recibido como se muestra en el flujograma de la Fig. 17.

```

[16/02/2019 19:27:30] Written data (COM8)
61 23 a#
[16/02/2019 19:27:31] Read data (COM8)
61 0d 0a a..
[16/02/2019 19:29:04] Written data (COM8)
62 23 b#
[16/02/2019 19:29:04] Read data (COM8)
62 0d 0a b..
[16/02/2019 19:29:19] Written data (COM8)
63 23 c#
[16/02/2019 19:29:20] Read data (COM8)
63 0d 0a c..

```

Fig. 16. Eliminación del fin de trama.

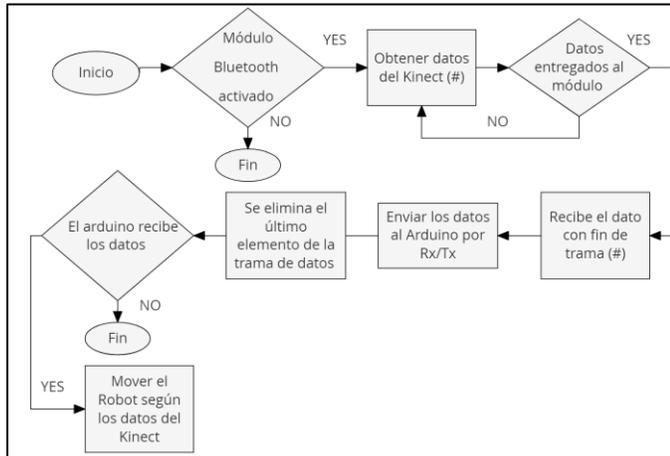


Fig. 17. Flujograma del Proceso del módulo Bluetooth del Esclavo.

• **Comunicación Bluetooth.**

La comunicación implementada con el módulo HC-05 utiliza un protocolo Bluetooth v2.0, con una velocidad de 9600 baudios a una frecuencia de 2,4 GHz con un alcance de 10 metros en campo abierto a una tasa de transmisión de 1Mbps.

La arquitectura de la comunicación Bluetooth está dividida en el host implementado en el software del sistema operativo y el controlador Bluetooth que es el módulo implementado en el hardware, además, posee el Host Controller Interface (HCI) que proporciona la interfaz entre el host y el controlador Bluetooth.

En la Tabla III se muestra el modelo de capa de protocolos de Bluetooth vs el modelo OSI.

TABLA III. OSI VS BLUETOOTH.

OSI	Bluetooth
Capa de aplicación	Aplicación
Capa de presentación	RFCOMM/SDP
Capa de sesión	L2CAP
Capa de transporte	HCI
	Gestor de enlace
Capa de red	Controlador enlace
Capa de enlace	Banda Base
Capa física	Radio

La trama de datos en Bluetooth está compuesta por el código de acceso, el encabezado que se debe repetir 3 veces para llenar los 54 bits y los datos. Ver Fig. 18.

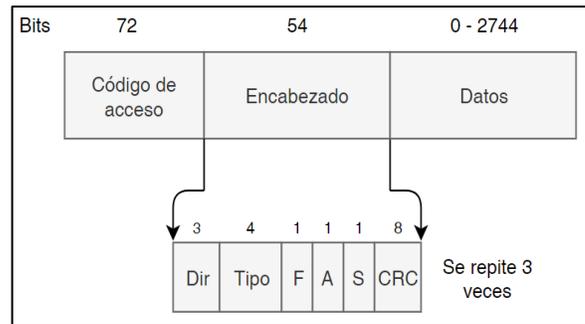


Fig. 18. Trama de datos Bluetooth.

La transferencia de datos de un dispositivo a otro es cuando el HCI en el maestro, intercambia los datos con el HCI en el esclavo, permitiendo así que ambas capas tengan la capacidad de intercambiar información.

D. Implementación del software Wifi.

La implantación del sistema Wifi consta del maestro, la comunicación y el esclavo, siendo un control unilateral y supervisado debido a que en el esclavo se tienen un cámara para la supervisión por parte del operador. Ver Fig. 19.

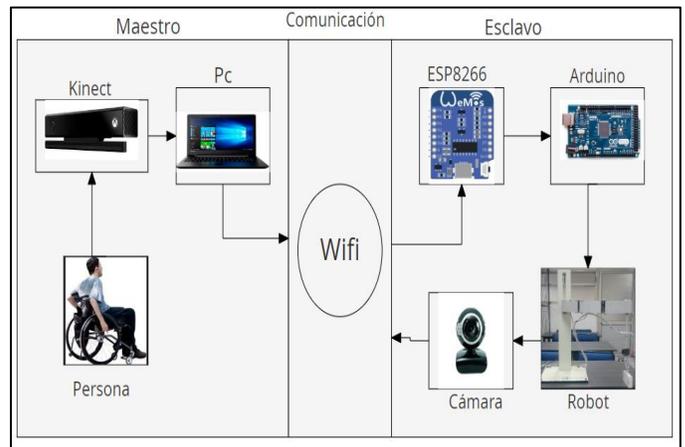


Fig. 19. Esquema Wifi.

El flujograma que se utiliza para la comunicación Wifi entre maestro y esclavo se puede observar en la Fig. 20. Donde el Pc, el módulo ESP8266 y la cámara se conectan a la red Wifi, el maestro envía los datos obtenidos por el sensor Kinect al esclavo mediante una comunicación Wifi y mueve al robot según el dato enviado.

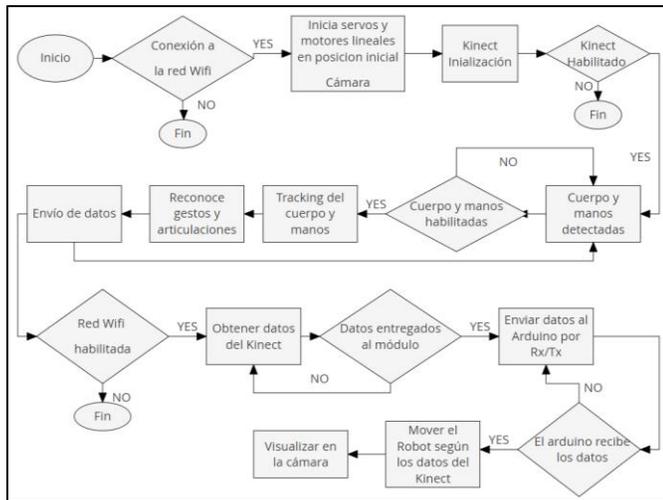


Fig. 20. Flujoograma general del sistema de Wifi.

• **Maestro.**

Para la implementación de la comunicación Wifi en el maestro se crea una red que permite enviar datos entre el maestro y el esclavo. Una vez creada la red llamada “wifitesis”, se debe conectar al Pc a fin de que el entorno de desarrollo de Visual Studio acceda a la red, dentro de la programación se indica la dirección IP (192.168.1.100), y el puerto (5050) del módulo ESP8266. Esto permite establecer la conexión y enviar los datos en tiempo real entre el maestro y el esclavo con una conexión UDP.

Cuando el sensor Kinect detecta el gesto y la posición de la mano envía los datos mediante comunicación Wifi al módulo ESP8266 que está conectado a la tarjeta Arduino. Como se muestra en el flujoograma de la Fig. 21.

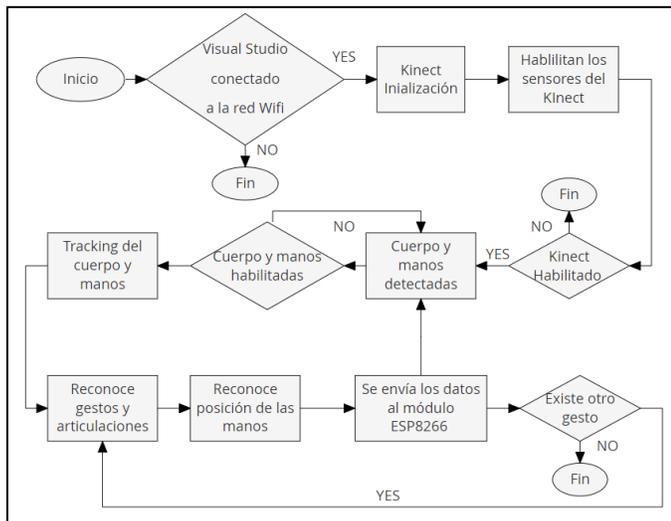


Fig. 21. Proceso del Visual Studio del Maestro.

El software de Visual Studio implementado en la comunicación Wifi para reconocer los gestos de mano abierta, mano cerrada y lazo es el mismo que se desarrolló en la comunicación Bluetooth. Como se mencionó en la Tabla II.

• **Esclavo.**

El software del esclavo funciona cuando el módulo ESP8266 se conecta a la red Wifi y recibe los datos del Pc, estos son enviados por comunicación serial a la tarjeta Arduino para el movimiento del robot según el dato recibido. Como se observa en la Fig. 22.

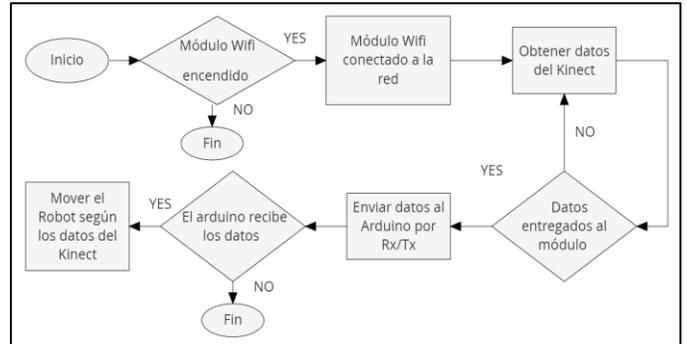


Fig. 22. Proceso del módulo ESP8266 del Esclavo.

Para la programación del módulo se debe agregar las librerías que permiten su correcto funcionamiento, esta permite configurar una conexión UDP con cliente. El módulo ESP8266 es el encargado de recibir los datos transmitidos desde el Pc y enviarlos por una comunicación serial a la tarjeta Arduino mediante los pines Rx y Tx.

Cámara: Para realizar el control del robot con supervisión se utilizó una cámara web conectada a un ordenador Raspberry y se accede a la misma con la dirección IP desde el navegador del Pc. Como se muestra en la Fig. 23.

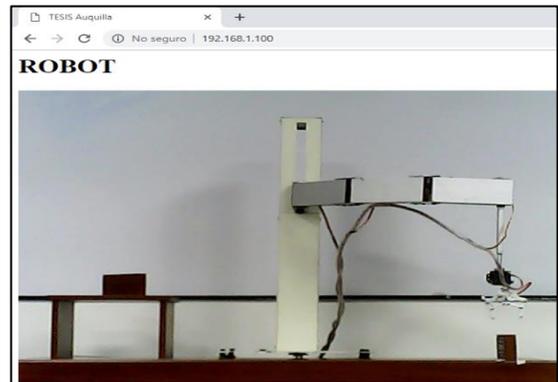


Fig. 23. Imagen de la cámara.

• **Comunicación WIFI.**

Para la implementación de la comunicación entre el maestro y esclavo se utiliza el sistema Wifi que es una red que tiene seguridad y permite trabajar con conexión UDP, la transmisión de datos se realiza en tiempo real para el movimiento del robot. A la vez el módulo ESP8266 utiliza una velocidad de 115200 baudios a un rango de frecuencia de 2.4 GHz - 2.5GHz a una tasa de transmisión de 11Mb/s a 150Mb/s.

El modelo de capa OSI del protocolo UDP es casi similar al TCP/IP, la diferencia es la capa de transporte que proporciona la funcionalidad necesaria para la entrega de datos entre

maestro y esclavo, en nuestro caso el protocolo usado es UDP. En la Tabla IV se muestra el modelo OSI vs el de TCP/IP.

TABLA IV. OSI Vs TCP/IP.

OSI		TCP/IP
Capa de aplicación	HTTP, DNS, DHCP	Capa de aplicación
Capa de presentación		
Capa de sesión		
Capa de transporte	TCP, UDP	Capa de transporte
Capa de red	IPv4 IPV6	Internet
Capa de enlace	Señal y transmisión	Acceso a la red
Capa física		

E. Hardware.

El hardware de la estación del maestro es un sensor Kinect conectado a un Pc que mediante el reconocimiento de los gestos envía los datos a través de una comunicación inalámbrica al esclavo para el movimiento del robot.

El hardware implementado en la estación del esclavo para el movimiento del robot manipulador de 4GDL está compuesto por una tarjeta Arduino MEGA donde van conectados los controladores lineales de cada actuador del robot, un módulo ESP8266 (Wifi), un módulo HC-05 (Bluetooth) y una cámara para la obtención de la imagen.

- **Hardware maestro.**

Sensor KINECT: El sensor Kinect de Microsoft permite trabajos por visión de computadora e interfaz de usuarios mediante la captación del movimiento de las articulaciones o de la detección de las manos. Además, estos procedimientos permiten aplicar al control del robot manipular de 4 GLD para ser utilizado por personas que presenta discapacidad física, facilitando la interacción hombre-máquina de una manera amigable [29].

TABLA V. CARACTERÍSTICAS DEL KINECT V2.

Características	Kinect V2
Cámara RGB	1920x1080@30fps
Cámara de profundidad	512x424
Distancia máxima profunda	4.5m
Distancia mínima profunda	50cm
Campo de visión horizontal	70 grados
Campo de visión vertical	60 grados
Motor de inclinación	No
Numero de articulaciones	26 articulaciones
Numero de esqueletos	6
Estándar USB	3.0
Sistema operático	Win 8

La tecnología que posee el sensor permite realizar el “tracking” de 26 articulaciones del cuerpo humano (Fig. 24) a 30 cuadros por segundo y el seguimiento del mismo, esto permite que sea una herramienta indispensable para la aplicación de este proyecto dirigido a personas con discapacidad y puedan incorporarse al mundo laboral, permitiéndoles manipular el robot de 4GDL utilizando 3 gestos

de las manos cuando el operador se encuentra a una distancia de 1,4 metros. [30] [31].

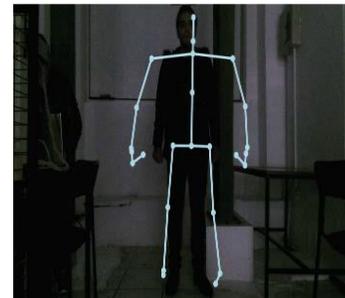


Fig. 24. Esqueleto humano.

El hardware del maestro es un sensor Kinect conectado por USB al Pc y a su vez éste se conecta al módulo HC-05 por Bluetooth, en el caso de Wifi se conecta al módulo Esp8266, luego, el sensor Kinect detecta los gestos de las manos y envía los datos de forma inalámbrica a los módulos. El hardware implementado se muestra en la Fig. 25.

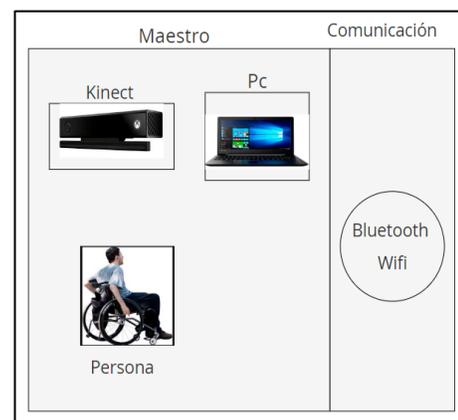


Fig. 25. Hardware implementado.

- **Hardware esclavo.**

Las tarjetas de comunicación que se utilizaron para realizar los sistemas de telerobótica son:

WEMOS D1 mini: Es una placa de desarrollo con ESP8266 usada en aplicaciones de transmisión de información de forma inalámbrica mediante Wifi tipo b/n/g, lo cual es compatibles con los protocolos TCP/IP y UDP. Para la programación del módulo se utiliza el entorno de desarrollo integrado en la tarjeta Arduino donde se puede crear una red o unirse a una existente, permitiendo integrar la comunicación Wifi en otros sistemas dando una red completa y autónoma. También, se puede agregar cualquier diseño basado en microcontroladores.

Cuenta con una memoria flash de 4MB y 16 pines (Véase en Fig. 26), de los cuales 11 son I/O digitales, todos los pines digitales pueden ser usados con PWM y I2C, además, tiene una entrada analógica y un puerto micro USB. El módulo tiene un alcance teórico de 30 metros [32].

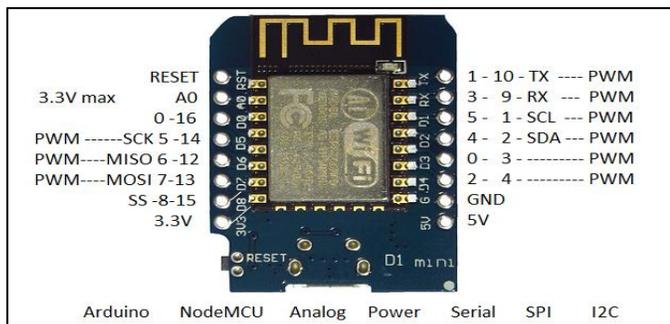


Fig. 26. WEMOS D1 mini [32].

Módulo HC-05: es un módulo Bluetooth basado en comunicación serial con funcionalidad inalámbrica bidireccional, tiene la función de enviar y recibir datos de otros dispositivos. El módulo cuenta con 6 pines, dos para la alimentación del dispositivo, dos dedicados a la transferencia de datos (Rx y Tx) y finalmente los pines State y En. (Véase en Fig. 27). Además, se basa en el protocolo Bluetooth v2.0 a una frecuencia de 2,4 Ghz, con un alcance de 5 a 10 metros [33].

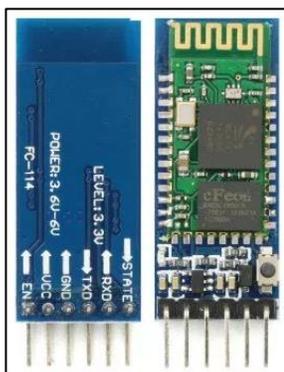


Fig. 27. HC-05 [33].

Arduino MEGA: es un microcontrolador basado en ATmega1280 de arquitectura simple y a su vez completa debido a que controla una amplia gama de sensores y librerías. Se alimenta mediante USB o por una fuente de poder y cuenta con 54 pines I/O digitales, 16 entradas analógicas, 14 entradas digitales con salidas PWM, un oscilador de cristal de 16MHz y 4 UARTs. Ver Fig. 28 [34].



Fig. 28. Arduino MEGA [34].

LAC-Firgelli Linear Actuator Control Board: Es un controlador diseñado específicamente para los actuadores lineales, requiere tan solo una salida analógica o digital para

controlar la posición del actuador. Las señales de entrada pueden ser USB, voltaje, corriente y PWM. Ver Fig. 29 [35].

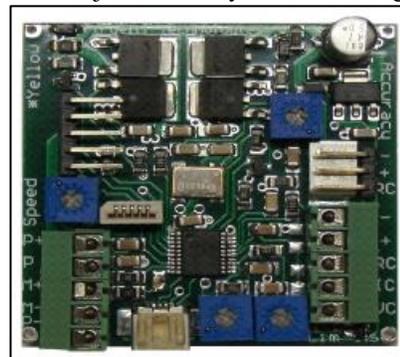


Fig. 29. Control Board [35].

El hardware del esclavo está compuesto por la estructura del robot, posee 2 articulaciones rotacionales, 2 lineales y el elemento final (pinza). En la Fig. 30 se puede observar la estructura del robot de 4 GDL, donde LG es Actuador lineal grande, LP el pequeño, S1, S2 los servomotores y el efector terminal (pinza). Los actuadores lineales tienen un movimiento vertical mientras los servos motores un movimiento de 180 grados.

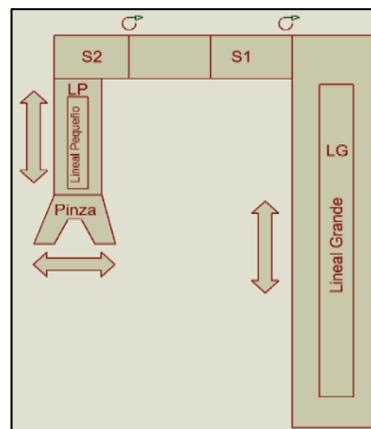


Fig. 30. Estructura del Robot.

Los elementos del esclavo van conectados de la siguiente manera: Los actuadores lineales LP y LG se conectan a las tarjetas de control lineal (LAC) y estas a su vez se conectan a la tarjeta Arduino para la señal del PWM. Los actuadores lineales trabajan a 6 y 12v respectivamente

Los servos motores S1, S2 y la pinza van conectados a la tarjeta Arduino para las señales del PWM. Además, el módulo HC-05 va conectado en los pines Rx y Tx con el fin de establecer comunicación con el maestro, en el caso del módulo Wifi Esp8266 los pines de conexión son los mismos. En la Fig. 31 y 32 se muestran las conexiones del sistema.

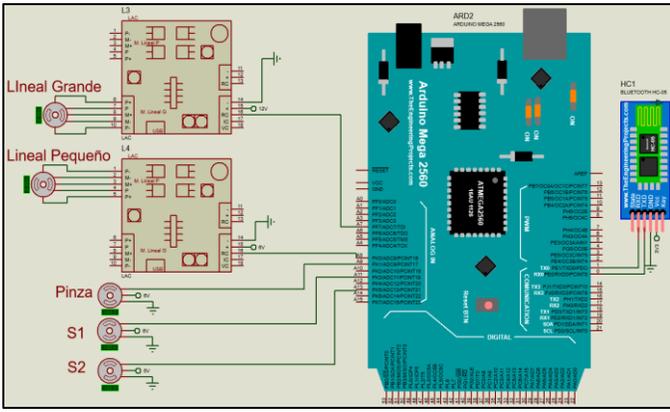


Fig. 31. Conexión del sistema de Bluetooth.

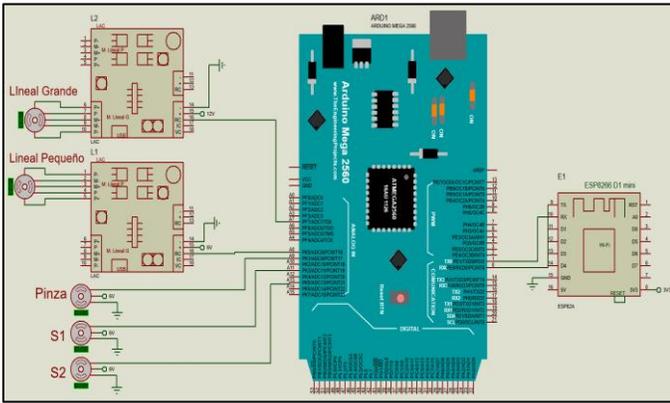


Fig. 32. Conexión del sistema de Wifi.

F. Procesos implementados.

Para comprobar el funcionamiento del sistema se han realizado dos procesos uno manual y otro de forma automática.

- **Proceso manual.**

El proceso manual del robot empieza cuando el sensor Kinect detecta la posición de la mano derecha abierta, seguidamente los servomotores S1 y S2 se mueven a la derecha. El segundo movimiento es el gesto de lazo accionando el actuador lineal L1 hacia abajo, en esta posición se abre la mano izquierda para abrir la pinza y se cierra para sujetar la pieza. El tercer movimiento se realiza manteniendo el gesto de lazo de la mano derecha pero ahora bajando levemente para accionar los actuadores L1 y L2 hacia arriba. El cuarto movimiento es mover la mano abierta hacia la izquierda accionando los servos S1 y S2 hacia la izquierda. El último movimiento se realiza con la mano izquierda con el gesto de lazo accionando los actuadores L1 y L2 hacia abajo.

Para el siguiente proceso se repiten los movimientos, con la diferencia de que el objeto transportado se ubica en un nivel superior. La posición X, Y para cada uno de los datos del proceso se puede observar en la Tabla VI y la Fig. 33.

TABLA VI. PROCESOS Y ÁNGULOS DE DESPLAZAMIENTO MANUAL.

Proceso	Dato	Posición (x, y)		Acción	Motor	Ángulo		
1	a	(0.01,0.4)	(0.01,0.4)	MD	S1	90 a 45		
				Abierta	S2	90 a 35		
2	b	(0.01,0.4)	(0.01,1)	MD	LP	72 a 108		
				Lazo				
3	c	(0.01,0.4)	(-1,0.011)	MD	LP	108 a 36		
				Lazo	LG	72 a 108		
4	d	(-0.5,0.04)	(0.01,1)	MD	S1	45 a 145		
				Abierta	S2	35 a 155		
5	e	(-1,0.01)	(0.01,1)	MI	LP	36 a 108		
				Lazo	LG	108 a 72		
Movimiento dos.								
6	f	(0.01,0.4)	(0.01,0.4)	MD	LP	108 a 36		
				Abierta			S1	145 a 10
							S2	155 a 10
7	g	(0.41,1)	(0.01,1)	MD	LP	36 a 108		
8	h	(0.41,1)	(-1,0.011)	MD	LP	108 a 36		
				Lazo	LG	72 a 108		
9	i	(-1,0.01)	(0.51,1)	MD	S1	10 a 180		
				Abierta	S2	10 a 180		
Pinza	1	ALL		MI	Pinza	25 a 80		
	2			Abierta		80 a 25		

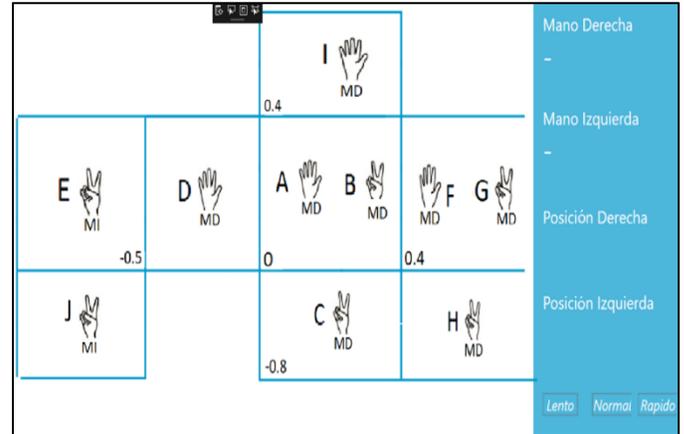


Fig. 33. Espacio designado.

- **Proceso Automático.**

El proceso automático del robot empieza cuando el sensor Kinect detecta la posición de la mano derecha abierta, haciendo el movimiento 1 donde el robot recoge la pieza y la ubica al otro lado a la misma altura, luego, con la mano derecha en lazo se activa el movimiento 2 ubicando al robot en la posición inicial y finalmente, con la mano izquierda en lazo se realiza el último movimiento donde recoge la pieza y la ubica en un nivel superior. La posición X, Y para cada uno de los datos del proceso se puede observar en la Tabla VII y Fig. 34.

- **Proceso automático.**

La secuencia de la trayectoria, como el movimiento del robot en función del gesto de la mano del proceso automático se puede observar en la Fig. 37 y 38 respectivamente.

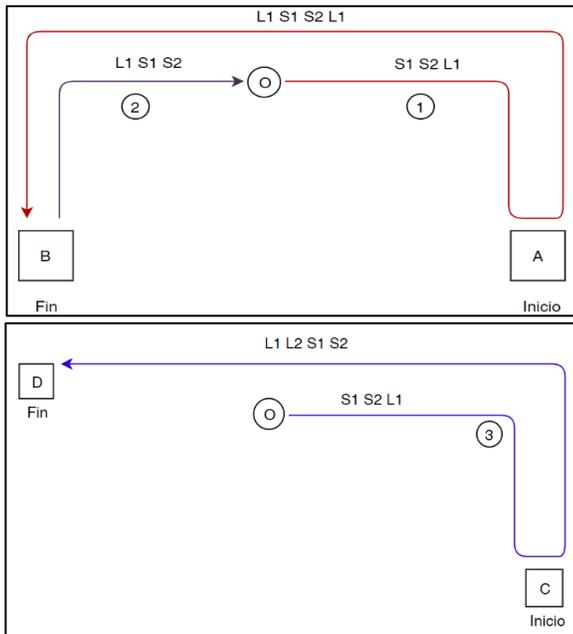


Fig. 37. Mapa de trayectoria del proceso automático.



Fig. 38. Secuencia del proceso automático.

- **Trama de datos.**

La trama de datos en Bluetooth se observa en la Fig. 39, donde se especifican los datos enviados desde el maestro al esclavo, el mismo que, una vez recibidos elimina el último término o fin de trama (#), lee el dato restante y lo envía a la tarjeta Arduino. Se utilizó el programa Serial Port Monitor para obtener los valores.

Time	Function	Direct...	Status	Data	Data...	D...	R...
19/02/2019 20:37:05	IRP_MJ_WRITE		DOWN	61 23	a#	2	2
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_WRITE		UP	STATUS_SUCCESS	61 23	a#	2
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_WAIT_ON_MASK)		UP	STATUS_SUCCESS	01 00...	....	4
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_WAIT_MASK)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_WAIT_MASK)		UP	STATUS_SUCCESS	19 01...	....	4
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		UP	STATUS_SUCCESS	00 00...	.....	20
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		UP	STATUS_SUCCESS	00 00...	.....	20
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_READ		DOWN				1
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_READ		UP	STATUS_SUCCESS	61	a	1
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_WAIT_ON_MASK)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_WAIT_ON_MASK)		UP	STATUS_SUCCESS	01 00...	....	4
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_WAIT_MASK)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_WAIT_MASK)		UP	STATUS_SUCCESS	19 01...	....	4
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		UP	STATUS_SUCCESS	00 00...	.....	20
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		DOWN				
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_GET_COMMSTATUS)		UP	STATUS_SUCCESS	00 00...	.....	20
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_READ		DOWN				2
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_READ		UP	STATUS_SUCCESS	0d 0a	..	2
19/02/2019 20:37:06	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_WAIT_ON_MASK)		DOWN				

Fig. 39. Trama de datos de Bluetooth [36].

- **Cobertura y tiempo de transmisión de los datos**

La transferencia de datos del sistema se realiza desde el sensor Kinect, que es el encargado de analizar el gesto de la mano para luego enviarlo al Pc, el mismo que mediante una comunicación Bluetooth envía los datos al módulo HC-05 que se encuentra conectado a la tarjeta Arduino que es la encargada de generar el movimiento de los servomotores del robot manipulador, como se muestra en la Fig. 40.



Fig. 40. Maestro / Esclavo.

Para la obtención de la distancia y el tiempo de transmisión de los datos se realizó diferentes pruebas como se puede observar en la Tabla VIII. Según las pruebas realizadas se obtuvo una distancia máxima de comunicación entre el Pc y el módulo HC-05 de 13,5 metros con línea de vista en un tiempo de 143,17 ms, la misma que se encuentra dentro de los parámetros recomendados por el fabricante del módulo.

TABLA VIII. TIEMPOS DE LA COMUNICACIÓN BLUETOOTH.

Bluetooth	
Distancia.	Tiempo de transmisión
5m	57.21ms
10m	67.38ms
13,5m	143,17ms

- **Evaluación del comportamiento del sistema**

Para evaluar el funcionamiento del sistema con la comunicación Bluetooth se realizó diferentes pruebas a 10 personas, las cuales por medio de los gestos de las manos ejecutaron el proceso manual y automático. Se analizó el comportamiento del robot, el tiempo en que se demora el usuario y las fallas del operador en el cumplimiento del proceso.

En la Fig. 41 se muestra el tiempo de aprendizaje entre los procesos, siendo el proceso manual de mayor tiempo de aprendizaje con 214,79 segundos con respecto al tiempo del proceso automático con 13,12 segundos, esto se debe a que toma más tiempo aprender las secuencias del proceso manual porque tiene más pasos con respecto al automático.

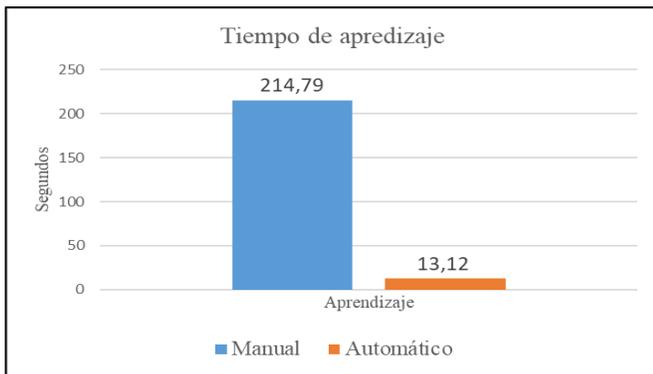


Fig. 41. Tiempo de aprendizaje.

En la Fig. 42 se observa el tiempo que se demora en realizar cada proceso. El tiempo que tarda en realizar el proceso de forma manual es de 149,56 segundos con respecto al proceso automático que se demora 125,77 segundos, esto se debe a que el usuario en el proceso manual le toma más tiempo realizar los gestos y mover las manos.

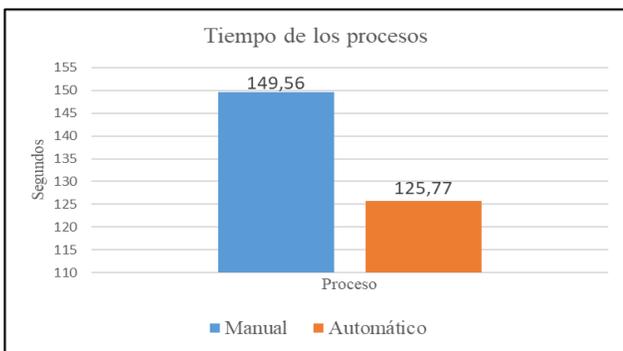


Fig. 42. Tiempo de los procesos.

El proceso automático se divide en 3 subprocesos o movimientos como se explicó anteriormente, en la Fig. 43 se muestra el tiempo que toma realizar cada uno de ellos, siendo el proceso P3 el que mayor tiempo tomó realizar la actividad debido a que tiene una mayor secuencia y el P2 es el de menor tiempo debido a que este mueve al robot a la posición de origen.

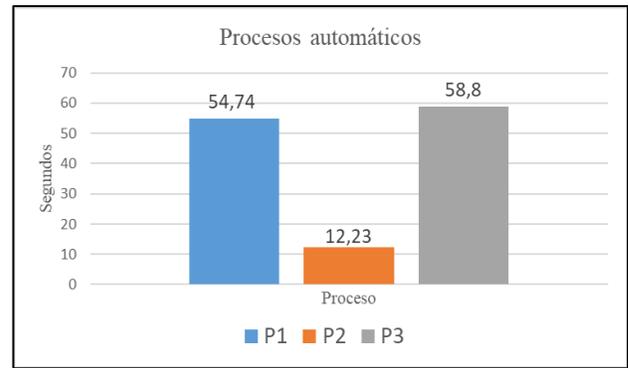


Fig. 43. Tiempo de los procesos automáticos.

Durante el proceso se detectaron 3 tipos de fallas: Fallo de la persona debido al control (F1), fallo de la persona debido al gesto de la mano (F2) y fallo debido a la secuencia del proceso (F3). Como se muestran en la Fig. 44, el fallo con mayor incidencia en el proceso manual es el F2 debido a la dificultad del operador al realizar el gesto de la mano.

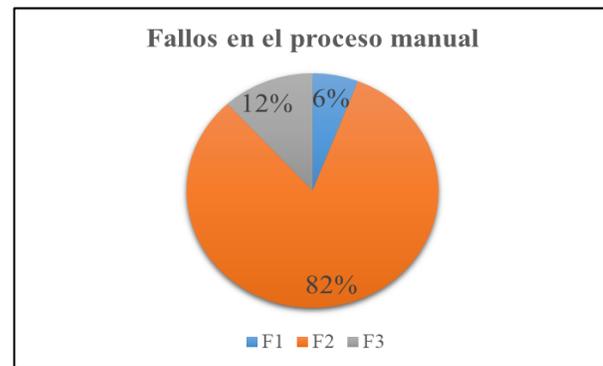


Fig. 44. Fallos en el proceso manual.

En el proceso automático el único error cometido es aquel que realiza la persona debido a la colocación del gesto de la mano (F2), demostrando que el proceso automático es más efectivo que el manual.

B. Análisis de los Resultados mediante de la Comunicación Wifi.

Evaluación del comportamiento de la trayectoria

- **Proceso manual**

Mediante la comunicación Wifi se logró implementar un proceso manual de trasladar una pieza del punto A al punto B y del punto C al punto D como se indicó en la Fig. 35a y 35b respectivamente.

En la Fig. 45 se puede observar el movimiento del robot en función del gesto de la mano para una comunicación Wifi, la diferencia que existe con la comunicación Bluetooth es que ahora existe una cámara para que el operador pueda visualizar el comportamiento del robot desde otro ambiente.

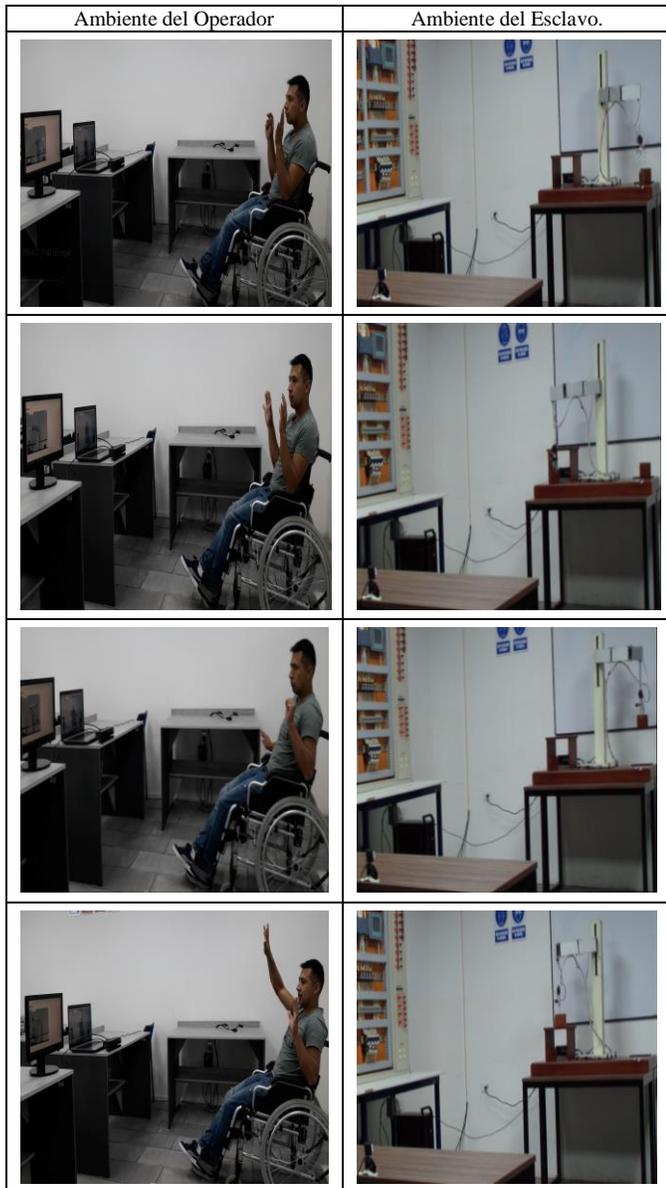


Fig. 45. Secuencia del proceso manual.

- **Proceso automático**

La secuencia de la trayectoria para el proceso automático es el mismo que se realizó con una comunicación Bluetooth como se indicó en la Fig. 37.

El movimiento del robot en función del gesto de la mano para el proceso automático se puede observar en la Fig. 46 donde el operador se encuentra en un ambiente diferente al que se encuentra el robot realizando su actividad.

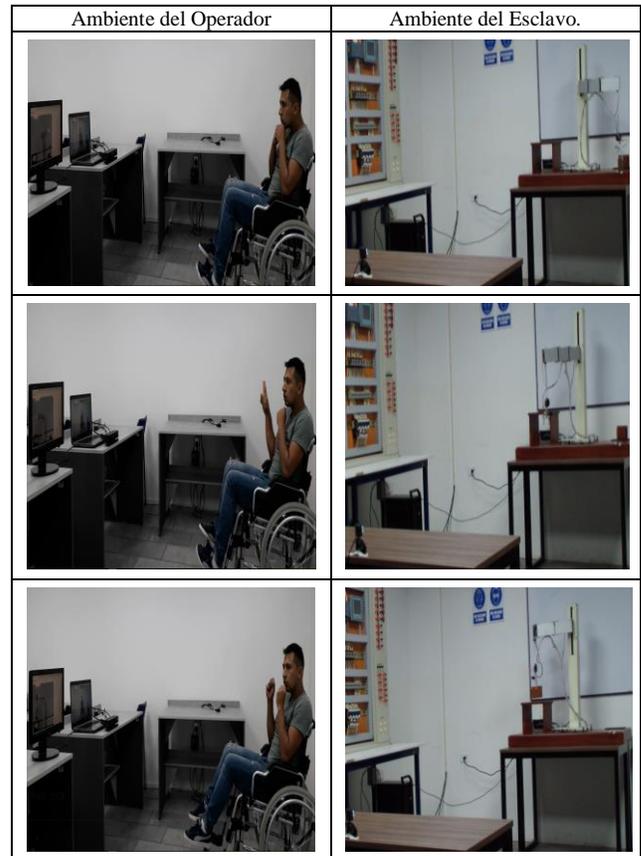


Fig. 46. Secuencia del proceso automático.

- **Trama de datos Wifi.**

En la Fig. 47 se observa el proceso de envío de los datos utilizando un protocolo UDP, donde se encuentra la dirección IP de origen/destino, el puerto de origen/destino, la longitud y el dato. Se utilizó el programa “Wireshark” para obtener la trama de datos de la comunicación Wifi.

```

Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.102, Dst: 192.168.1.100
  0100 ..... = Version: 4
  .... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
    0000 00.. = Differentiated Services Codepoint: Default (0)
      .... 00.. = Explicit Congestion Notification: Not ECN-Capable Transport (0)
  Total Length: 29
  Identification: 0x52a8 (21160)
  Flags: 0x0000
    0... .. = Reserved bit: Not set
    .0... .. = Don't fragment: Not set
    ..0... .. = More fragments: Not set
    ...0 0000 0000 0000 = Fragment offset: 0
  Time to live: 128
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0x640d [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 192.168.1.102
  Destination: 192.168.1.100
  User Datagram Protocol, Src Port: 50382, Dst Port: 5050
  Source Port: 50382
  Destination Port: 5050
  Length: 9
  Checksum: 0x4238 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  [Stream index: 41]
  Data (1 byte)
  Data: 61
  [Length: 1]
  0000 5c cf 7f 54 18 fd 60 6c 66 cb 63 62 08 00 45 00  \..T..l f:cb..E.
  0010 00 1d 52 a8 00 00 00 11 64 0d c0 a8 01 66 c0 a8  ..R.....d....f..
  0020 01 64 c4 ce 13 ba 00 09 42 38 52                -d.....88
  
```

Fig. 47. Trama de datos UDP [37].

Por lo tanto, el datagrama de datos del protocolo UDP se puede observar en la Tabla IX, en el cual, la entrega de datos es de baja carga e ideal para la rápida transferencia de datos en tiempo real.

TABLA IX. DATAGRAMA UDP.

Datagrama UDP	
Bit(0)	Bit(15) Bit(16) Bit(31)
Puerto de origen	Puerto de destino
50382	5050
Longitud	Checksum
9	0x04238
Datos: Longitud =1 (1 byte)	
A	

- Cobertura y tiempo de transmisión de los datos.**

La transferencia de datos del sistema se realiza desde el sensor Kinect, encargado de analizar los gestos de las manos y luego enviarlos al Pc, mismo que mediante una comunicación Wifi envía los datos al módulo ESP8266 que se encuentra conectado a la tarjeta Arduino que es la encargada de generar el movimiento del robot. En la Fig. 48 se puede observar los datos recibidos del sensor Kinect.

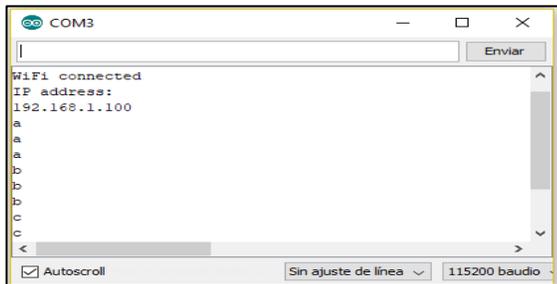


Fig. 48. Datos recibidos.

La comunicación Wifi permite realizar el control del robot en diferentes ambientes, es decir, el robot (esclavo) con su respectiva tarjeta de control (Arduino), el módulo Wifi ESP8266 y la cámara se puede encontrar en un lugar que sea inaccesible para las personas o presenten algún riesgo para las mismas Fig. 49, y en otro lugar se encuentra la persona (maestro) encargada de controlar el robot por medio del sensor Kinect utilizando los gestos de la mano, el mismo que tiene acceso al control por medio de un monitor que le permite visualizar el proceso que está realizando el manipulador, como se muestra en la Fig. 50.



Fig. 49. Estación del esclavo.

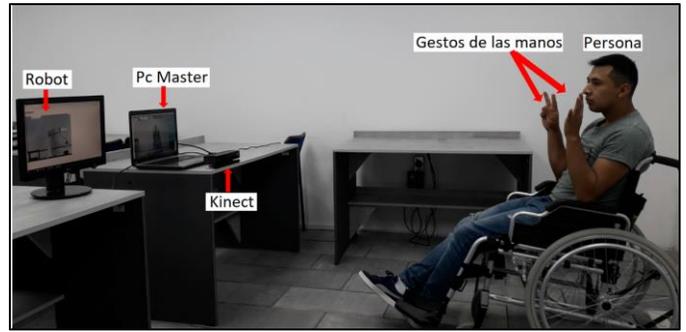


Fig. 50. Estación del maestro.

Para la obtención del tiempo de trasmisión de datos se colocó el router junto al Pc (maestro) y en el otro extremo el módulo Wifi ESP8266 junto al robot (esclavo), se realizó pruebas con diferente distancia como se muestra en la Tabla X, en la cual se obtuvo que para una distancia máxima de 34 metros con línea de vista se obtuvo un tiempo de 16,9 ms, misma que se encuentra dentro de los parámetros recomendados por el fabricante.

TABLA X. TIEMPOS DE LA COMUNICACIÓN WIFI.

Wifi		
Distancia entre el maestro y el esclavo	Tiempo de transmisión de datos entre maestro y esclavo con línea de vista.	Transmisión de la imagen de la cámara al monitor
5m	2,1ms	Correcta
10m	2,9ms	Correcta
15m	3,6ms	Correcta
20m	4ms	Correcta
25m	4,7ms	Con retardo de tiempo
30m	6,2ms	Con retardo de tiempo
34m	16,9ms	Con retardo de tiempo

- Evaluación del comportamiento del sistema.**

El funcionamiento del sistema con la comunicación Wifi se evaluó realizando diferentes pruebas a 10 personas las cuales por medio de los gestos de las manos ejecutaron el proceso manual y automático. Se analizó el comportamiento del robot en cada proceso, el tiempo que se demora el usuario en realizar los procesos y las fallas que puede tener el operador.

En la Fig. 51 se muestra el tiempo de aprendizaje entre los procesos, siendo el proceso manual de mayor tiempo de aprendizaje con 228,24 segundos con respecto al tiempo del proceso automático con 12,725 segundos, esto se debe a que toma más tiempo aprender las secuencias del proceso manual con respecto al automático.

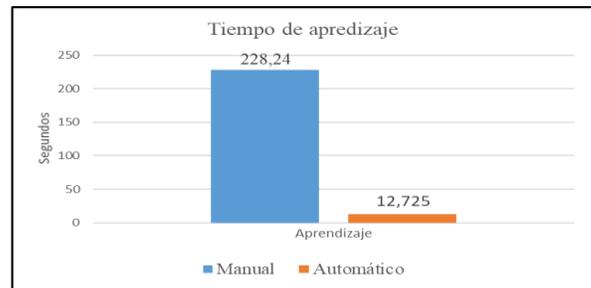


Fig. 51. Tiempo de aprendizaje.

En la Fig. 52 se observa el tiempo que se demora en realizar cada proceso siendo el proceso manual de mayor tiempo con 135,402 segundos con respecto al proceso automático con 122,814 segundos esto se debe a que el usuario en el proceso manual le toma más tiempo realizar los gestos y mover las manos.

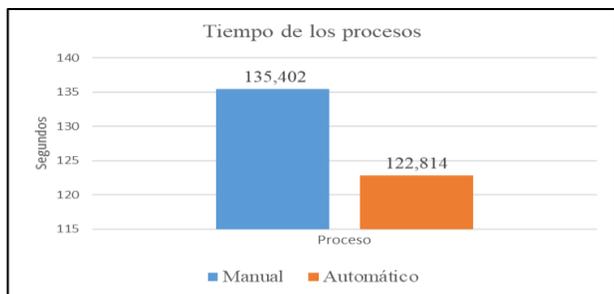


Fig. 52. Tiempo de aprendizaje.

El proceso automático se divide en 3 subprocesos o movimientos como se explicó anteriormente, en la Fig. 53 se muestra el tiempo que toma cumplir cada uno de ellos, siendo el proceso P3 el de mayor duración debido a que tiene una mayor secuencia y el P2 es el de menor tiempo debido a que este mueve al robot a la posición de inicio.

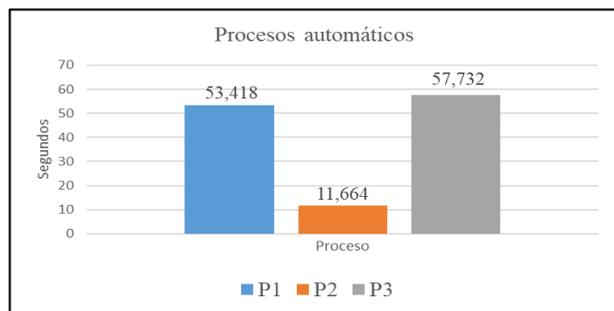


Fig. 53. Tiempo de los procesos automáticos.

Dentro de las fallas obtenidas durante el control del robot se detectaron tres tipos de fallas: Fallo de la persona debido al control (F1), fallo de la persona debido al gesto de la mano (F2) y fallo debido a la secuencia del proceso (F3). Como se muestran en la Fig. 54, el fallo con mayor incidencia en el proceso manual es el F2 debido a la dificultad del operador al realizar el gesto de la mano o confunde el gesto.

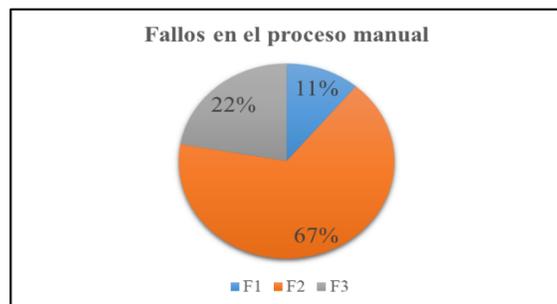


Fig. 54. Tiempo de los procesos automáticos.

En el proceso automático el único error cometido es el F2 debido a la colocación del gesto de la mano, demostrando que el proceso automático es más práctico que el manual.

IV. CONCLUSIONES

La implementación del sistema de telerobótica para el control de un robot manipulador de 4GDL mediante el sensor Kinect para personas con discapacidad física, permitió obtener buenos resultados, debido a que se realizaron pruebas con proceso manual y con proceso automático a un grupo de 10 personas, donde se analizó el tiempo de aprendizaje, el tiempo que duró en cumplir con el proceso y los fallos obtenidos en los mismos. Además, no se presentaron demoras en la comunicación con el robot ya que la trama de datos no es muy extensa y las personas se sintieron más seguras al usar el robot por medio de la comunicación Wifi debido a que presenta una cámara para la supervisión del proceso.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que la implementación del sistema utilizando una comunicación inalámbrica presentó mejores resultados que la comunicación mediante cable, por tal motivo, este sistema puede ser utilizado en cualquier ambiente industrial, donde las personas con discapacidad pueden acceder a cualquier ambiente de trabajo, reduciendo de esta manera las dificultades que se presentan en las actividades laborales.

El sistema de telerobótica que se realizó mediante una comunicación Bluetooth permitió controlar el manipulador a una distancia máxima de 13,5 metros en campo abierto disminuyendo la misma a medida que se introducía algún tipo de obstáculo, además a mayor distancia se vuelve más inestable y en el peor de los casos se pierde la conexión.

La implementación con la comunicación Wifi permitió realizar un control a una distancia de 34 metros en campo abierto, se ubicó el router junto al Pc (maestro), lo cual permitió colocar la cámara web a una mayor distancia para realizar la supervisión del proceso, a medida que se aumentó la distancia a partir de los 25 metros comenzó a existir una demora en la transmisión de la imagen a pesar que la transferencia de datos fue estable. Al introducir obstáculos en la línea de vista entre el router y el módulo Esp8266 (esclavo) se mantenía la conexión y la transferencia de datos.

Los datos enviados desde el maestro al esclavo llegan de forma más rápida en la comunicación Wifi debido a que tiene una mayor velocidad de transmisión con respecto a la comunicación Bluetooth. Así mismo ambos sistemas trabajan a una frecuencia de 2.4Ghz siendo recomendable usar este valor debido a que si se aumenta se mejora la velocidad de transmisión, pero se reduce el rango de red.

Para la comunicación Bluetooth con el módulo HC-05 se debe trabajar a una velocidad de 9600 baudios debido a que si se aumenta se puede perder los datos transmitidos, mientras tanto en la comunicación Wifi el módulo ESP8266 trabaja a 115200 baudios volviéndole más rápido para la transferencia de datos.

Si se aumenta la trama de datos en la comunicación Bluetooth, el tiempo de recepción es mayor, igual que para analizarlos y enviarlos a la tarjeta Arduino, esto se debe a que en esta comunicación se debe eliminar el último término o fin de trama para que los datos sean enviados al robot, mientras que en la

comunicación Wifi esto no sucede y los datos llegan de forma directa y en menor tiempo.

La conexión Bluetooth realiza una conexión punto a punto y no permite conectar otros dispositivos, mientras una conexión Wifi permite conectar a varios dispositivos a la red como la cámara para la supervisión del proceso, lo cual lo vuelve un control supervisado y más completo, permitiendo así trabajar en dos ambientes diferentes.

Debido a que la comunicación Bluetooth posee una seguridad baja cualquier dispositivo desconocido se puede conectar al módulo HC-05 impidiendo el control del robot, mientras en la comunicación Wifi la seguridad es mayor porque para establecer una conexión se debe acceder a la red con una contraseña volviéndolo así un sistema más complejo y de mayor costo de instalación.

La utilización de la cámara en la comunicación Wifi es importante, aunque en algunos casos limita a la comunicación. Se realizó el sistema de supervisión de 2 formas, la primera con una cámara IP de seguridad la cual mostro un retardo superior a los 5s y perdiendo la transmisión en algunos momentos. La segunda forma se realizó con un ordenador Raspberry o Pc utilizando una cámara web mostrando una mejora con respecto a la anterior con un retardo de alrededor de unos 2s siendo esta la mejor forma. Este sistema depende mucho de la antena del dispositivo.

Finalmente, en la tabla XI y XII se puede observar las diferencias entre la comunicación Bluetooth y Wifi implementadas.

TABLA XI. BLUETOOTH VS WIFI.

	Bluetooth	Wifi
Costo	Bajo	Alto
Seguridad	Baja	Moderada
Frecuencia	2.4 GHZ	2.4 GHZ
Tipo de conexión	Punto a Punto	Multipunto
Distancia	13.5 m	34 m
Tipo de control	Unilateral	Supervisado
Baudios	9600	115200
Protocolo	V2.0	b/n/g
Facilidad de uso	Simple	Complejo
Velocidad.	3Mb/s	11 a 150Mb/s
Permite Obstáculos	No	Si

TABLA XII. OSI VS BLUETOOTH VS WIFI.

OSI	Bluetooth	Wifi
Capa de aplicación	Aplicación	Capa de aplicación
Capa de presentación	RFCOM/SDP	
Capa de sesión	L2CAP	
Capa de transporte	HCI	Capa de transporte (UDP)
	Gestor de enlace	
Capa de red	Controlador enlace	Internet
Capa de enlace	Banda base	Acceso a la red
Capa física	Radio	

V. REFERENCIAS

[1] Percy W. Lovon-Ramos; Yessica Rosas-Cuevas; Claudia Cervantes-Jilaja; Maria Tejada-Begazo; Raquel E. Patiño- Escarcina; Dennis Barrios-Aranibar “People Detection and Localization in Real Time during Navigation of Autonomous Robots” IEEE Conferences .pp. 239-244, 2016

[2] CONAES, Consejo Nacional para la igualdad de discapacidades 2018[En línea]. Available: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec>. [Ultimo acceso: 10 de junio 2018]

[3] Luis Adrián García A. y Julio C. Correa “Desarrollo de aplicaciones para un manipulador serial en el laboratorio de robótica de la universidad Pontificia Bolivariana” IEEE Colombia Conference on Robotic and Automation (CCRA), pp. 1-5, 2016

[4] Jose Avalos; Oscar E. Ramos “ Real-time teleoperation with the Baxter robot and the Kinect sensor” IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), pp. 1-4, 2017.

[5] Hugo Torres, Andrés Auquilla, Omar Alvarado, Claudio Urrea, “ An Industrial Application of a Human-Robot Interface for People with Physical Disabilities Using Hand Gestures” IEEE ANDESCON, pp. 1-5, 2018.

[6] Francisco Javier, (2013) Velocidad de Respuesta de brazo Robótico Utilizando sensor Kinect. Santiago de Chile. Recuperado el 15 de octubre de 2017.

[7] Sammy Pfeiffer, (2011) Guiado gestual de un robot humanoide mediante un sensor Kinect. Barcelona. Recuperado el 15 de oct. de 2017.

[8] Syed Islam, Mayez Al-Mohammed, Rafiqul Islam, Maumita Bhattacharya, Talal Mousa Alkharobi and Seyed M. Buhari. “Design of an Augmented Telerobotic Stereo Vision System and Associated Security Concerns (2015).

[9] Saad Hafiane ; Yasir Salih ; Aamir S. Malik. “3D hand recognition for telerobotics” IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI), pp. 132-137, 2013.

[10] Guoliang Zhong ; Yukinori Kobayashi ; Yohei Hoshino ; Takanori Emaru, “Intuitive teleoperation of nonholonomic mobile robot with a manipulator based on virtual reality and WiFi” IET International Conference on Information Science and Control Engineering, pp. 1-5, 2012.

[11] B. Apolloni; A. Moise “Long distance telerobotics in hostile environment” Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN 2000. Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium, pp. 152-157, 2000.

[12] Xie Xiaohui ; Du Zhijiang ; Sun Lining ” The design and implementation of real-time Internet-based telerobotics ” IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, pp. 815-819, 2003.

[13] Lijun Zhao ; Yihuan Liu ; Ke Wang ; Peidong Liang ; Ruifeng Li “An intuitive human robot interface for tele-operation” 2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), pp.454-459, 2016.

[14] Kyung-Rok Kim ; Seok-Hwan Jeong ; Woo-Yong Kim ; Youngjun Jeon ; Je-Hoon Hong “Design of small mobile robot remotely controlled by an android operating system via bluetooth and NFC communication” 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) pp. 913-915, 2017.

[15] Akash Singh ; Tanisha Gupta ; Manish Korde “Bluetooth controlled spy robot” International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC) pp. 1-4, 2017.

[16] Jaemyung Ryu ; Yeongyun Kim ; Hua O. Wang ; Dong Hun Kim “Wireless control of a board robot using a sensing glove” 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) pp.423-428, 2014.

[17] Xiao Li ; Peter Kazanzides “Parameter estimation and anomaly detection while cutting insulation during telerobotic satellite servicing” IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) pp.4562-4567, 2015.

[18] Chunxu Li ; Chenguang Yang ; Peidong Liang ; Angelo Cangelosi ; Jian Wan “Development of Kinect based teleoperation of Nao robot” International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM) pp.133-138, 2016.

[19] Reyes Cortés, F. (2011). Robótica - control de robots manipuladores. México: Alfaomega. Recuperado el 4 de febrero de 2017.

[20] Ruiz Velasco Sanchez , E. (2012). Los robots. Madrid: Diaz de santos. Recuperado el 4 de febrero de 2017

- [21] Germán Buitrago Salazar, Olga Lucía Ramos Sandoval, Darío Amaya Hurtado. (2016). Sistema de telerobótica para entrenamiento en asistencia quirúrgica. Recuperado el 22 de ene. de 2019.
- [22] Cosme Rafael Marcano Gamero. (2008). Interfaces para Aplicaciones de Telerrobóticas y de Teleoperación. Recuperado el 22 de enero del 2019.
- [23] Antonio Barrientos. (2007). Fundamentos de robótica. España Mc Graw Hill Recuperado el 4 de septiembre de 2018.
- [24] Anibal Ollero B. (2001). Robótica manipuladores y robot móvil España: Marcombo Recuperado el 4 de febrero de 2018.
- [25] Emmanuel Nuño Ortega, Luis Basañez Villaluenga. (2004). Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente. Recuperado el 22 de ene. de 2019.
- [26] Jordi Salazar. Redes Inalámbricas. Techpedia. Recuperado 22 de ene. de 2019.
- [27] Akin ramirez. (2015). Principios básicos de enrutamiento y switching CCNA1 V5. Recuperado el 4 de diciembre de 2018.
- [28] Josep Prieto Blazquez Introducción a los sistemas de comunicación inalámbricos Recuperado el 13 de enero del 2018.
- [29] Microsoft, “Microsoft Kinect” 2017. [En línea]. Available: <https://msdn.microsoft.com>. [Último acceso: 4 de octubre 2018]
- [30] Liu Zhaoming; Liu Nailong; Wei Qing; Cui Long “Motion description language for trajectory generation of a robotmanipulator” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 1950-1955, 2017
- [31] Y. Chen y W. Zhang, “Research and Implementation of Sign Language Recognition Method Based on Kinect” IEEE International Conference on Computer and Communications, pp. 1947-1951, 2016.
- [32] Datasheet WeMos D1- Mini – Series ESP8266, www.esinstatic.com (en línea)
- [33] Datasheet HC-05, info@iteadstudio.com (en línea)
- [34] Arduino, “Arduino Mega”, 2018. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Último acceso: 4 de octubre 2018].
- [35] LAC Firgelli linear Actuator Control Board, www.firgelli.com (en línea)
- [36] HHD software, “Serial port monitor” 2018. [En línea]. Available: <https://www.serial-port-monitor.com>. [Último acceso: 5 de enero 2019]
- [37] WIRESHARK, “Wireshark” 2018. [En línea]. Available: <https://www.wireshark.org>. [Último acceso: 5 de febrero 2019]