



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN
ROBOT MÓVIL PARA TELEPRESENCIA CONTROLADO A TRAVÉS DE
INTERNET**

**AUTORES: CÓRDOVA LARA, FREDDY EDISON
MEDINA TORRES, SANTIAGO ALEJANDRO**

DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN ROBOT MÓVIL PARA TELEPRESENCIA CONTROLADO A TRAVÉS DE INTERNET" fue realizado por los señores Córdova Lara Freddy Edison y Medina Torres Santiago Alejandro, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de octubre del 2018

Msc. David César Loza Matovelle
DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Córdova Lara Freddy Edison, con cédula de identidad N° 0603945593, y Medina Torres Santiago Alejandro, con cédula de identidad N° 1724002744 declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN ROBOT MÓVIL PARA TELEPRESENCIA CONTROLADO A TRAVÉS DE INTERNET" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 16 de octubre del 2018

Freddy Edison Córdova Lara
CC. 0603945593

Santiago Alejandro Medina Torres
CC. 1724002744



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Córdova Lara Freddy Edison, con cédula de identidad N° 0603945593, y Medina Torres Santiago Alejandro, con cédula de identidad N° 1724002744, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UN ROBOT MÓVIL PARA TELEPRESENCIA CONTROLADO A TRAVÉS DE INTERNET" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de octubre del 2018

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval.

Freddy Edison Córdova Lara
CC. 0603945593

A handwritten signature in blue ink.

Santiago Alejandro Medina Torres
CC. 1724002744

DEDICATORIA

El trabajo está dedicado a nuestras familias, que con sus sabios consejos y enseñanzas diarias nos formaron para ser mejores personas. Fue su ejemplo, trabajo duro y mucha dedicación, lo que nos ha llevado a alcanzar esta meta. Nos atrevimos a soñar y ahora vemos plasmado en realidad lo que un día nos propusimos.

Freddy y Santiago

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios Padre como pilar fundamental, dador de oportunidades, sustentador en todo tiempo y amigo fiel durante este trayecto. A nuestros padres, quienes con su ejemplo nos demostraron que el esfuerzo da frutos. A nuestros hermanos y hermanas que, con su cariño, preocupación y con su aliento, nos permitieron seguir adelante en este camino.

A nuestros compañeros de universidad que, durante el trayecto de la carrera se volvieron nuestros mejores amigos, apoyándonos en momentos difíciles y con quienes hemos llegado a disfrutar de increíbles anécdotas.

También, queremos agradecer a nuestros profesores que en cada semestre impartieron los conocimientos necesarios que ahora se ven reflejados en este trabajo. Como no agradecer también a nuestro director de tesis Msc. David Loza, por cada consejo brindado, su perseverancia en guiarnos y sin escatimar esfuerzos nos encaminó para que el presente trabajo tenga realce, veracidad y nuevos estándares de excelencia.

Gracias a todos y cada uno, por el apoyo brindado durante el desarrollo de nuestro trabajo de titulación. A través del cual no sólo hemos probado lo aprendido, sino que también logramos realizarnos como nuevos emprendedores. Los inconvenientes en el camino han sido muchos, tanto externos como internos, pero los hemos superado. Las lecciones son muchas y se quedan con nosotros para nuevos proyectos.

Freddy y Santiago

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-------|
| CERTIFICADO DEL DIRECTOR | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xi |
| ÍNDICE DE FIGURA | xiv |
| RESUMEN | xviii |
| ABSTRACT | xix |
| CAPÍTULO I | 1 |
| DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Planteamiento del Problema | 3 |
| 1.3. Justificación e Importancia | 4 |
| 1.4. Alcance | 5 |
| 1.5. Objetivos | 6 |
| 1.5.1. Objetivo general | 6 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 6 |
| 1.6. Estructura del documento | 6 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO II | 8 |
| ESTADO DEL ARTE | 8 |
| 2.1. Telepresencia | 8 |
| 2.1.1. Ventajas de la telepresencia | 9 |
| 2.2. Teleoperación | 9 |
| 2.2.1. Elementos de un sistema de teleoperación | 10 |
| 2.2.2. Métodos de control en teleoperación | 12 |
| 2.2.3. Aplicaciones de sistemas de teleoperación robótica | 15 |
| 2.3. Robots de Telepresencia | 17 |
| 2.3.1. Elementos de un robot de telepresencia | 17 |
| 2.4. Sistemas de visión artificial empleados en la Robótica | 18 |
| 2.4.1. Introducción a la visión artificial | 19 |
| 2.4.2. Etapas de un sistema de visión artificial | 20 |
| 2.4.3. Visión artificial aplicada al reconocimiento de rostros | 21 |
| 2.5. Navegación inteligente en robots móviles | 27 |
| 2.6. Resumen | 28 |
| CAPÍTULO III | 30 |
| DISEÑO DEL ROBOT DE TELEPRESENCIA CONTROLADO VÍA | 30 |
| INTERNET | 30 |
| 3.1. Matriz de calidad | 30 |
| 3.1.1. Definición de necesidades | 30 |
| 3.1.2. Definición de las características técnicas | 31 |
| 3.1.3. QFD | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Factibilidad y planeación | 33 |
| 3.2.1. Estructura funcional | 33 |
| 3.3. Subsistema 1. Base del robot de telepresencia | 35 |
| 3.3.1. Modelamiento dinámico. | 35 |
| 3.3.2. Movilidad del robot | 41 |
| 3.3.3. Controlador de motores DC | 42 |
| 3.3.4. Sistema de regulación de altura del robot | 43 |
| 3.3.5. Controlador del actuador lineal | 44 |
| 3.3.6. Análisis estático de diseños | 45 |
| 3.3.7. Base metálica del robot | 46 |
| 3.3.8. Selección del computador para el robot de telepresencia | 51 |
| 3.3.9. Sistema de detección de obstáculos | 52 |
| 3.3.10. Diseño electrónico de la tarjeta de control | 53 |
| 3.3.11. Funcionamiento del subsistema 1 | 54 |
| 3.4. Subsistema 2. Sistema de movimiento para la pantalla y la cámara | 55 |
| 3.4.1. Diseño del mecanismo para la rotación del eje vertical | 56 |
| 3.4.1.1. Alternativas de Diseño | 56 |
| 3.4.2. Selección de actuadores del sistema para el eje vertical | 58 |
| 3.4.3. Controlador de motores a paso | 59 |
| 3.4.4. Cálculo del sistema de transmisión mecánica | 60 |
| 3.4.5. Selección de la pantalla | 63 |
| 3.4.6. Selección de la cámara web | 64 |
| 3.4.7. Estructura de la base del sistema giratorio | 64 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.4.8. | Diseño electrónico de la placa de control para los actuadores | 66 |
| 3.4.9. | Diseño electrónico de la tarjeta para la iluminación RGB | 67 |
| 3.4.10. | Análisis de Volcamiento | 67 |
| 3.4.11. | Funcionamiento del subsistema 2 | 69 |
| 3.5. | Subsistema 3. Suministro de energía | 70 |
| 3.5.1. | Alimentación del robot | 70 |
| 3.5.2. | Selección del tipo de batería | 71 |
| 3.6. | Subsistema 4. Comunicación | 72 |
| 3.6.1. | WAN | 72 |
| 3.6.2. | Topología de red | 73 |
| 3.6.3. | Videollamada y comandos de control a través de fbchat | 73 |
| 3.7. | Subsistema 5. Sistema de visión artificial | 74 |
| 3.7.1. | Método de programación | 74 |
| 3.7.2. | Algoritmo del sistema de reconocimiento de rostros | 75 |
| 3.8. | Subsistema 6. Interfaz humano máquina (HMI) | 77 |
| 3.8.1. | Distribución de la HMI | 78 |
| 3.8.2. | HMI del superusuario | 78 |
| 3.8.3. | HMI del robot | 81 |
| 3.9. | Concepto final | 83 |
| 3.10. | Resumen | 83 |
| CAPÍTULO IV | | 85 |
| IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS | | 85 |

| | |
|---|-----|
| | x |
| 4.1. Implementación | 85 |
| 4.1.1. Estructura de la base del robot | 85 |
| 4.1.2. Estructura del soporte para el actuador lineal | 87 |
| 4.1.3. Instalación de los componentes a la base del robot | 88 |
| 4.1.4. Estructura para el movimiento de la pantalla y la cámara web | 88 |
| 4.1.5. Instalación de los soportes para la cámara y pantalla | 89 |
| 4.1.6. Elaboración de las placas electrónicas de control | 91 |
| 4.1.7. Instalación de placas electrónicas | 93 |
| 4.1.8. Fabricación e instalación del chasis del robot | 95 |
| 4.1.9. Panel de control | 96 |
| 4.2. Pruebas y resultados | 97 |
| 4.2.1. Pruebas de la batería | 97 |
| 4.2.2. Prueba del reconocimiento de usuarios | 98 |
| 4.2.3. Prueba del tiempo de respuesta del robot. | 102 |
| 4.2.4. Pruebas para la geolocalización | 103 |
| A. Resultados de la geolocalización | 104 |
| 4.2.5. Resumen | 105 |
| CAPÍTULO V | 106 |
| CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 106 |
| 5.1. Conclusiones | 106 |
| 5.2. Recomendaciones | 107 |
| 5.3. Trabajos futuros | 109 |
| Bibliografía | 110 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Aplicaciones de la visión artificial</i> | 18 |
| Tabla 2 <i>Métodos para reconocimiento de acuerdo al tipo de datos</i> | 21 |
| Tabla 3 <i>Requerimientos o necesidades del consumidor</i> | 30 |
| Tabla 4 <i>Especificaciones técnicas del proyecto</i> | 31 |
| Tabla 5 <i>Resultados de la matriz QFD</i> | 33 |
| Tabla 6 <i>Subsistemas definidos para el diseño</i> | 33 |
| Tabla 7 <i>Conceptos de la estructura del robot, 3 posibles soluciones</i> | 34 |
| Tabla 9 <i>Características técnicas de los motores de los motores</i> | 42 |
| Tabla 10 <i>Conclusión de la selección del tipo de motor DC</i> | 42 |
| Tabla 11 <i>Especificaciones técnicas de los controladores para motor</i> | 43 |
| Tabla 12 <i>Conclusión de la selección del tipo de driver para el motor DC</i> | 43 |
| Tabla 13 <i>Características del actuador lineal</i> | 44 |
| Tabla 14 <i>Características de las soluciones para el driver del actuador lineal</i> | 44 |
| Tabla 15 <i>Conclusión de la selección del tipo de driver para el actuador lineal</i> | 45 |
| Tabla 16 <i>Análisis estático de los elementos del robot</i> | 45 |
| Tabla 17 <i>Características para las soluciones de la computadora</i> | 51 |
| Tabla 18 <i>Conclusión de la selección del tipo de computador para el robot</i> | 51 |
| Tabla 19 <i>Especificaciones de los Sensores Infrarrojos</i> | 52 |
| Tabla 20 <i>Especificaciones para el actuador del sistema del eje vertical</i> | 59 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Tabla 21 | <i>Conclusión del motor para el sistema de rotación del eje vertical.....</i> | 59 |
| Tabla 22 | <i>Especificaciones del driver para el motor a pasos</i> | 59 |
| Tabla 23 | <i>Datos para el cálculo de los engranes del sistema de visión.....</i> | 60 |
| Tabla 24 | <i>Especificaciones de la pantalla.....</i> | 64 |
| Tabla 25 | <i>Especificaciones de la cámara web</i> | 64 |
| Tabla 26 | <i>Análisis estático para las piezas del subsistema 1</i> | 65 |
| Tabla 27 | <i>Consumo energético del robot</i> | 70 |
| Tabla 28 | <i>Especificaciones de las soluciones para la elección de la batería</i> | 71 |
| Tabla 29 | <i>Conclusión de la selección del tipo de batería</i> | 71 |
| Tabla 30 | <i>Arquitectura de la HMI del sistema</i> | 79 |
| Tabla 31 | <i>Arquitectura de la HMI de robot.....</i> | 81 |
| Tabla 32 | <i>Parámetros de la estructura.....</i> | 85 |
| Tabla 33 | <i>Hoja de procesos para la estructura de la base.....</i> | 86 |
| Tabla 34 | <i>Parámetros del perfil circular.....</i> | 89 |
| Tabla 35 | <i>Descripción de las etiquetas de la placa del subsistema 2D</i> | 92 |
| Tabla 36 | <i>Descripción de las etiquetas de la placa del subsistema 1</i> | 93 |
| Tabla 37 | <i>Funciones del panel de control del robot.....</i> | 97 |
| Tabla 38 | <i>Descarga de la batería en función del tiempo</i> | 98 |
| Tabla 39 | <i>Requisitos de la placa dedicada para el reconocimiento facial</i> | 99 |
| Tabla 40 | <i>Requisitos de software.....</i> | 99 |
| Tabla 41 | <i>Resultados de la prueba 1</i> | 100 |
| Tabla 42 | <i>Resultados de la prueba 2</i> | 100 |
| Tabla 43 | <i>Resultados de la prueba 3</i> | 101 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 44 <i>Requisitos del servicio para el tiempo de respuesta del robot</i> | 102 |
| Tabla 45 <i>Resultados del tiempo de respuesta del robot</i> | 102 |
| Tabla 46 <i>Pruebas de la geolocalización</i> | 104 |

ÍNDICE DE FIGURA

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.</i> Padbot, robot de telepresencia para videoconferencias | 1 |
| <i>Figura 2.</i> RP-Vita, robot para asistencia médica..... | 2 |
| <i>Figura 3.</i> Robot Mashi..... | 3 |
| <i>Figura 4.</i> Boceto del Robot de Telepresencia | 5 |
| <i>Figura 5.</i> Sala de telepresencia utilizada a nivel empresarial..... | 9 |
| <i>Figura 6.</i> Elementos de un sistema de teleoperación | 10 |
| <i>Figura 7.</i> Sensores en un sistema de teleoperación | 11 |
| <i>Figura 8.</i> Esquema de control teleoperado unilateral..... | 13 |
| <i>Figura 9.</i> Esquema de control teleoperado bilateral..... | 13 |
| <i>Figura 10.</i> Control bilateral FESTO..... | 14 |
| <i>Figura 11.</i> Control supervisado y coordina aplicado en la medicina | 15 |
| <i>Figura 12.</i> Robot para exploraciones lunares | 16 |
| <i>Figura 13.</i> Avión teleoperado para aplicaciones militares | 16 |
| <i>Figura 14.</i> Elementos de un robot de telepresencia..... | 17 |
| <i>Figura 15.</i> Sistema de reconocimiento facial utilizado por FBI..... | 19 |
| <i>Figura 16.</i> Etapas del sistema de visión artificial..... | 21 |
| <i>Figura 17.</i> Preprocesamiento de una imagen | 22 |
| <i>Figura 18.</i> Extracción de componentes relevantes del rostro..... | 23 |
| <i>Figura 19.</i> Método Eigenfaces | 25 |
| <i>Figura 20.</i> Imágenes generadas | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Vector LBP | 26 |
| Figura 22. Cálculo de la distribución de textura | 27 |
| Figura 23. Matriz QFD del proyecto..... | 32 |
| Figura 25. Configuración diferencial para el modelamiento dinámico..... | 36 |
| Figura 26. Parámetros del movimiento | 38 |
| Figura 27. Diagrama de bloques del modelo dinámico..... | 40 |
| Figura 28. a) Gráficas de entrada, b) Gráficas de salida de los motores DC | 41 |
| Figura 29. Base metálica de la estructura del robot | 46 |
| Figura 30. Diagrama de fuerzas que actúan en el perfil plano yz | 47 |
| Figura 31. Diagrama de fuerzas que actúan en el perfil plano xy..... | 48 |
| Figura 32. a) Diagramas de Fuerza Cortante a) plano yz, b) plano xy | 49 |
| Figura 33. Diagramas de Momento Flector a) plano yz, b) plano xy | 49 |
| Figura 34. Características del perfil seleccionado para la base del robot | 50 |
| Figura 35. Funcionamiento de sensores en lazo cerrado..... | 53 |
| Figura 36. Esquema del circuito para la tarjeta de control principal | 54 |
| Figura 37. Diagrama de flujo del funcionamiento del robot..... | 55 |
| Figura 38. Mecanismo para la rotación del eje vertical | 56 |
| Figura 39. Sistema de poleas con correa Fuente: (Betancur, 2011)..... | 56 |
| Figura 40. Sistema de transmisión por engranajes Fuente: (Befi, 2013) | 57 |
| Figura 41. Sistema de tornillo sin fin Fuente: (Brettis, 2012)..... | 58 |
| Figura 42. Diseños finales de los engranajes | 63 |
| Figura 43. Análisis estático del sistema de movimiento giratorio | 65 |
| Figura 44. Circuito electrónico del sistema de 2 grados de libertad | 66 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 45.</i> Esquema del circuito para la placa del sistema de las cintas RGB..... | 67 |
| <i>Figura 46.</i> Diagrama de fuerzas que actúan sobre el robot | 68 |
| <i>Figura 47.</i> Funcionamiento del subsistema 2 | 69 |
| <i>Figura 48.</i> Topología de red del robot de telepresencia | 73 |
| <i>Figura 50.</i> Diagrama de flujo del proceso de reconocimiento de rostros..... | 77 |
| <i>Figura 51.</i> Distribución de la HMI..... | 78 |
| <i>Figura 52.</i> Diagrama de funcionamiento de la HMI del super usuario | 80 |
| <i>Figura 53.</i> Diagrama de flujo de la HMI del robot | 82 |
| <i>Figura 54.</i> Concepto final..... | 83 |
| <i>Figura 55.</i> Parámetros de impresión 3d en el programa RepetierHost | 87 |
| <i>Figura 56.</i> Actuador lineal instalado al soporte | 87 |
| <i>Figura 57.</i> Instalación de los actuadores a la base del robot | 88 |
| <i>Figura 58.</i> Sistema de dos grados de libertad..... | 88 |
| <i>Figura 59.</i> Impresión 3D de la base del subsistema 2 | 89 |
| <i>Figura 60.</i> Instalación de los motores a paso y engranajes | 89 |
| <i>Figura 61.</i> Instalación de los soportes laterales..... | 90 |
| <i>Figura 62.</i> Instalación de la cámara web y la pantalla | 90 |
| <i>Figura 63.</i> Instalación de la pantalla y la cámara web | 90 |
| <i>Figura 64.</i> Ensamble de subsistemas..... | 91 |
| <i>Figura 65.</i> Etiquetado de la placa del subsistema 2 | 92 |
| <i>Figura 66.</i> Etiquetado de la placa del subsistema 1 | 93 |
| <i>Figura 67.</i> Instalación de placas electrónicas | 94 |
| <i>Figura 68.</i> Instalación de la placa electrónica para la iluminación RGB | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 69. Instalación de actuadores de la placa principal..... | 94 |
| Figura 70. Proceso de fabricación del chasis | 96 |
| Figura 71. Implementación del robot de telepresencia completo | 96 |
| Figura 72. Panel de control del robot | 97 |
| Figura 73. Lectura de medidas de voltaje | 98 |
| Figura 75. Imágenes de entrenamiento para la prueba 1 | 99 |
| Figura 76. Imágenes de entrenamiento para la prueba 2..... | 100 |
| Figura 77. Imágenes de entrenamiento para la prueba 3..... | 101 |
| Figura 78. Prueba de Geolocalización por IP..... | 104 |

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un robot de telepresencia. El objetivo principal es construir un robot móvil y controlarlo por medio de internet. En los capítulos 1 y 2 se describe los conceptos básicos de la telepresencia y los métodos de teleoperación aplicados a la robótica. También se habla de la visión artificial y se describe el algoritmo de Viola Jones. El capítulo 3 comienza con la selección de las alternativas de diseño, tomando en cuenta las especificaciones que debe cumplir el robot. A continuación, se realiza el diseño de los componentes electrónicos, mecánicos y de software, para ello se divide en subsistemas para facilitar el proceso. En el capítulo 4 se describe el desarrollo de los subsistemas que conforman el robot de telepresencia, para luego realizar las pruebas respectivas que son analizadas con la finalidad de comprobar el funcionamiento del sistema. Adicionalmente se realizó una comparación de los algoritmos de Viola Jones utilizados para la identificación de usuarios. El trabajo finaliza en el capítulo 5 donde se dan las conclusiones, además de recomendaciones para el funcionamiento óptimo del robot y se plantean propuestas para futuros trabajos.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBOT DE TELEPRESENCIA**
- **RECONOCIMIENTO DE ROSTROS**
- **VISION ARTIFICIAL**
- **CONTROL POR INTERNET**

ABSTRACT

In the present work, a telepresence robot is being designed and built. The main objective is to build a Mobil robot that is controlled remotely Through the internet. Chapters one and two describe the basic concepts Of Tele-presence and Teleoperational methods applied to robotics. Artificial vision is also discussed in these chapters. As well, as a brief description of Viola Jones algorithm. Chapter three begins with a selection of design alternatives, taking into account the specifications that the robot must meet. Next, the design of the electronic, mechanical and software components is carried out, it is divided into subsystems to facilitate the process. It is necessary to emphasize that the robot has being divided in six sub-systems to easy out the process of designing. Chapter four describes each one of the sub-systems that make up the telepresence robot. Which will lead to perform respective tests that are analyzed to check functionality of the systems. In Addition, a comparison of the Viola Jones algorithms was used to identify each of the users. The work ends in chapter five where the conclusions can be found, as well as recommendations for the optimal functioning of the robot and proposals for future work are proposed.

KEY WORDS:

- **TELEPRESENCE**
- **RECOGNITION OF FACES**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **INTERNET CONTROL**

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1. Introducción

En la actualidad, la comunicación entre diversas partes del mundo se ha convertido en una prioridad para el desarrollo de las personas. Se busca disminuir la complejidad de gestión y los costos que involucran la comunicación a distancia, de manera que la implementación de robots con telepresencia permite llevar el control y supervisión de uno o varios procesos, logrando aumentar la productividad y eficiencia de los mismos a través de una optimización de tiempo. Adicionalmente, la integración de robots con telepresencia ha permitido desarrollar un amplio campo de aplicaciones para los mismos tales como interacción, asesoría y ayuda en diversas disciplinas y actividades diarias (Bardales & et all, 2009).

A nivel mundial, existen varias aplicaciones que incorporan robots de telepresencia. En países como China se ha desarrollado un robot denominado Padbot (magazine, 2014), el cual es utilizado en el entorno empresarial para realizar videoconferencias, de manera que se consigue ahorrar costos de traslados y tiempo. También se utiliza como medio de supervisión en el entorno doméstico (Ver Figura 1), con la finalidad de garantizar la seguridad del hogar.



Figura 1. Padbot, robot de telepresencia para videoconferencias

Fuente: (magazine, 2014)

En Estados Unidos, los robots de telepresencia tienen su aplicación en el campo de la medicina. Por ejemplo, el robot RP-Vita (emol , 2017) diseñado por las empresas iRobot e Intouch Health, permite al médico tratar a sus pacientes de forma remota (Ver Figura 2).



Figura 2. RP-Vita, robot para asistencia médica
Fuente: (magazine, 2014)

En la industria de la seguridad y defensa, los robots de telepresencia son utilizados para diversas aplicaciones. Un ejemplo es el robot Packbot (Ncyt, 2017), de la empresa Irobot, que realiza tareas peligrosas para el hombre tales como manipular y desactivar bombas e incluso la exploración de terrenos minados. También se presentan aplicaciones para robots de telepresencia en el campo infantil, en la que se destaca el robot Buddy (Silicon, 2017) de la empresa Blue Grof Robotics, el cual permite a los padres supervisar a sus hijos, cuando se encuentren lejos de casa y adicionalmente brinda la posibilidad de interactuar con el niño.

En el Ecuador no se ha tenido un desarrollo significativo en el campo de los robots de telepresencia debido a su alto costo. Sin embargo, la implementación de los mismos permitirá proporcionar una supervisión continua a cualquier proceso que tendría como resultado el aumento de productividad y disminución de costos. Por otro lado, con el cambio de la matriz productiva y el alto interés del gobierno por incrementar el turismo en el país, se han desarrollado proyectos innovadores, como el robot Mashi (Consulado General del Ecuador en Barcelona, 2015), siendo el

primer robot de telepresencia realizado por un ecuatoriano en Barcelona España como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Robot Mashi

Fuente: (Consulado General del Ecuador en Barcelona, 2015)

El proyecto propone el diseño y construcción de un robot móvil para telepresencia, que puede ser controlado a través de internet y adicionalmente presenta la opción de desplazamiento inteligente con la implementación de sensores para evitar colisiones.

1.2. Planteamiento del Problema

En la actualidad, con el avance de la tecnología y las comunicaciones, la sociedad busca realizar ciertas actividades que cubren grandes distancias en el menor tiempo posible, implementando estrategias tecnológicas que permitan lograr un proceso eficiente evitando pérdidas de tiempo y recursos económicos.

En las aplicaciones como la supervisión de procesos, el personal encargado se ve obligado a visitar las áreas bajo su control y posteriormente realizar los informes respectivos, lo que genera un desperdicio de tiempo y recursos económicos debido a la movilización de personal. Adicionalmente, en diferentes actividades laborales, del hogar y de la vida cotidiana se tiene la necesidad de un control remoto que permita realizar diversas actividades a distancia con la finalidad de evitar desplazamientos innecesarios.

Para satisfacer las necesidades actuales se requieren medios efectivos de comunicación. A pesar que en los últimos años el internet se ha convertido en una herramienta poderosa para permitir la conexión entre diferentes partes del mundo, no es un medio interactivo que cumpla con las exigencias de la sociedad actual. Por tanto, la implementación de un sistema de telepresencia permitirá proporcionar al usuario una comunicación interactiva y eficiente que represente una alternativa de solución a los problemas actuales de comunicación a nivel mundial.

1.3. Justificación e Importancia

La implementación de un robot de telepresencia en la industria y el hogar ecuatoriano proporcionará diversas ventajas. En el campo industrial, permitirá la supervisión a diferentes áreas sin necesidad que el personal se desplace de un lugar a otro. En el ámbito de la docencia será posible brindar información a los estudiantes y dar cátedras sin necesidad de estar presente de manera simultánea y finalmente los usuarios que empleen el robot dentro del hogar, podrán realizar sus tareas con mayor tranquilidad, sabiendo que pueden monitorear a sus hijos desde su propio lugar de trabajo.

De acuerdo con el plan nacional del buen vivir 2013-2017, el cual presenta como uno de sus objetivos principales impulsar la transformación de la matriz productiva, se propone fomentar a la industria ecuatoriana en el desarrollo de tecnología y por medio de la investigación y el conocimiento generar riqueza y fuentes de empleo en el país. Con la finalidad de ser pioneros en el campo de la teleoperación aplicada a la robótica, el presente proyecto pretende incursionar en temas afines a la robótica móvil y los robots controlados vía remota.

Por lo tanto, se propone el diseño, construcción e implementación de un robot de telepresencia interactivo para brindar información a las personas que visiten el Laboratorio de Procesos de

Manufactura. Además, pretende incrementar el interés de los estudiantes en la rama de la robótica móvil y la robótica remota.

1.4. Alcance

Con el desarrollo del proyecto, se plantea la inclusión de sistemas de interacción. Se propuso la construcción de un robot de telepresencia que consta de equipos y elementos mecánicos, los cuales a través de una pantalla pueden reproducir la apariencia de una persona. Por medio del control y programación, el usuario será capaz de brindar información y supervisar a otras personas con la ayuda del robot de telepresencia. Además, tendrá la capacidad de moverse de forma teleoperada gracias a su plataforma móvil como se puede observar en la Figura 4.

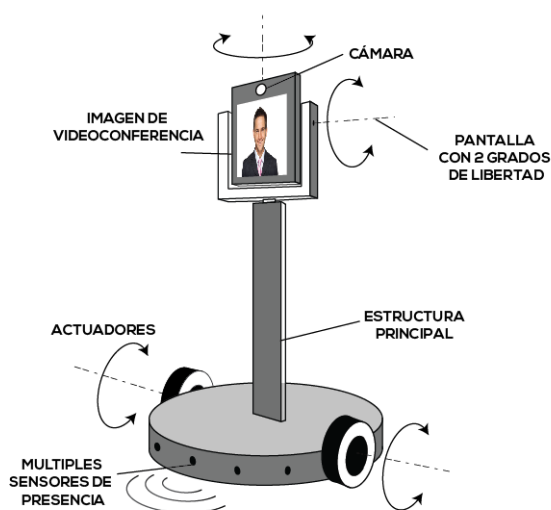


Figura 4. Boceto del Robot de Telepresencia

Fuente: (Consulado General del Ecuador en Barcelona, 2015)

Los elementos que conforman el robot se describen a continuación:

- **La plataforma móvil:** es una de las partes principales para el desplazamiento del robot mediante un control teleoperado.

- **Unidad de control:** estará ubicada en el interior donde se incorporarán actuadores para la movilidad y sensores de proximidad, para evitar posibles choques por la presencia de objetos a su alrededor.
- **Estructura principal:** tendrá un sistema de ajuste de altura para la pantalla que reproducirá la imagen transmitida vía internet por la persona que lo utilice.

1.5. Objetivos

1.5.1. *Objetivo general*

Diseñar y construir un prototipo de un robot móvil para telepresencia controlado a través de internet.

1.5.2. *Objetivos específicos*

- Realizar el diseño mecánico, tanto de la plataforma móvil, como de la estructura del sistema de orientación.
- Diseñar el sistema electrónico que contendrá al circuito de potencia, el circuito de sensores y de acondicionamiento de señales.
- Desarrollar e implementar un sistema para evitar colisiones.
- Realizar el reconocimiento de rostros por medio de un sistema de visión artificial, para el envío de la señal de alerta al usuario.

1.6. Estructura del documento

En el primer capítulo se muestra la descripción general del proyecto. Se describen los antecedentes de la implementación de la telepresencia a nivel mundial para el beneficio de la sociedad. Posteriormente se identifica el problema y se plantea la justificación, tomando en cuenta cada rama referente al proyecto, se define el alcance y se delimitan los objetivos del mismo.

En el capítulo dos se realiza el estado del arte acerca de la robótica, la teleoperación y sus elementos. A continuación, se describe la visión artificial y su aplicación para el reconocimiento de rostros y finalmente se describe los fundamentos de la navegación inteligente.

El capítulo tres corresponde al diseño del robot, dividiendo al mismo en subsistemas, se realizan los cálculos para la estructura de la base y el sistema de movimiento giratorio, para continuar con el diseño electrónico de las placas de control. Además, se detalla el algoritmo que se va aplicar para el reconocimiento de usuarios, y se realiza el diseño de la HMI tanto para el robot como para el superusuario.

En el capítulo cuatro se describe la construcción del robot mediante su división por subsistemas, tanto para los componentes mecánicos, electrónicos y de software. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos en función de las pruebas realizadas.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto con propuestas para realizar trabajos futuros.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se describe los aportes teóricos más relevantes que serán utilizados para el desarrollo del proyecto. Se inicia definiendo la telepresencia y teleoperación, su funcionamiento y la forma en la que han permitido mejorar la calidad de vida de las personas. Después, se describe la visión artificial, sus aplicaciones y se analiza los aspectos principales que serán parte fundamental para el reconocimiento de rostros. Finalmente, se describe la navegación inteligente y la forma en la que ayudará al robot de telepresencia para darle autonomía de manera que pueda moverse sin la necesidad del control humano.

2.1. Telepresencia

La telepresencia, es considerada la transmisión de la imagen de una persona, acompañada de sonido, a lugares lejanos, permitiendo al usuario superar las limitaciones que genera la distancia y por consiguiente, estar presente en más de dos lugares al mismo tiempo, aunque no sea de manera física. Uno de los objetivos de la telepresencia es suprimir la distancia geográfica entre dos o más personas, por medio de una videoconferencia o una proyección.

La telepresencia antiguamente se limitaba a proyectar una imagen de tamaño irreal, con baja calidad de audio y video. Sin embargo, en la actualidad la tecnología en redes y comunicación ha avanzado considerablemente permitiendo un entorno visual de alto desempeño, brindando al usuario una experiencia que garantiza la sensación de estar presente en una conversación a pesar de encontrarse en otra parte del mundo. El proceso lo han realizado muchas empresas como AT/T y Polycom (DiarioTi, 2017).

Los sistemas de telepresencia generalmente utilizan controles dinámicos en tiempo real y utilizan visión por computador para supervisión de lugares donde el usuario no se encuentra

geográficamente (Ver Figura 5) o lugares de alto riesgo para el ser humano (Muñoz & García, 2015).



Figura 5. Sala de telepresencia utilizada a nivel empresarial
Fuente: (Techno Trends, 2010)

2.1.1. Ventajas de la telepresencia

La telepresencia aplicada tanto a nivel industrial como en el hogar presenta varias ventajas como se detalla a continuación:

- Reducción en tiempos de transporte
- Agilidad en la toma de decisiones
- Reducción de gastos de movilización
- Comunicación ampliada a todos los lugares del mundo
- Mayor comodidad para el usuario

2.2. Teleoperación

Un sistema de teleoperación, es un conjunto de elementos tecnológicos que permiten controlar un dispositivo a distancia por medio de un operario, a través de un sistema de manejo localizado en el punto de trabajo del operador (Ortega E. N., 2004). Las limitaciones que presenta un sistema teleoperado se originan en la capacidad de procesamiento, precisión y la coordinación entre el dispositivo teleoperado y la persona que lo controla.

2.2.1. Elementos de un sistema de teleoperación

Como se puede ver en la Figura 6, un sistema de teleoperación consta de los siguientes elementos:

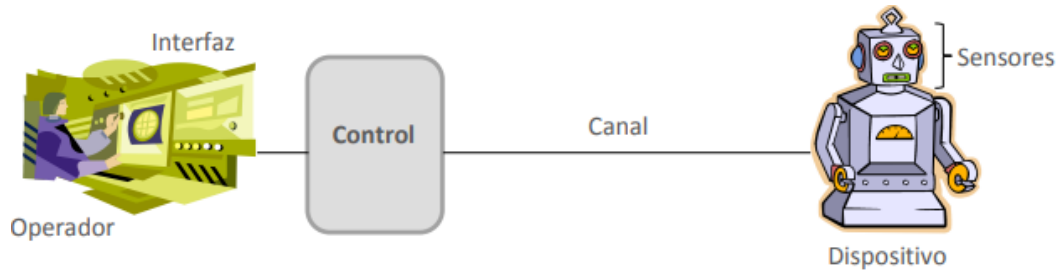


Figura 6. Elementos de un sistema de teleoperación

Fuente: (Ballesteros, 2012)

- **Operador o teleoperador:**

Es la persona encargada de controlar a uno o varios dispositivos, por medios alámbricos o inalámbricos para realizar una determinada tarea. El control es continuo cuando el operario debe estar constantemente manipulando al robot y es control intermitente cuando no se necesita enfocar la atención constantemente en el robot y solo se requiere algunas instrucciones y supervisión cada cierto tiempo para realizar sus actividades.

- **Dispositivo teleoperado**

El dispositivo teleoperado puede ser una máquina, robot manipulador, o incluso robots móviles, tomando en cuenta que el robot teleoperado trabaja en la zona remota y que por medios inalámbricos puede ser controlado por el operador, también es conocido como dispositivo de telepresencia (Ballesteros, 2012).

- **Interfaz para la teleoperación**

La interfaz es el conjunto de dispositivos, elementos y actuadores, sean físicos o digitales, que permiten interactuar con el dispositivo a controlar. A la interfaz también se la conoce como HMI,

la cual permite enviar y recibir información con el robot, ofreciendo un entorno amigable para la interacción con el mismo.

Según (Nuño & Basañez, s.f.) las interfaces de teleoperación se dividen en 3 categorías: Interfaces directas, interfaz multimodal o multisensorial y control supervisado.

- **Control y canales de comunicación de un sistema teleoperado**

El control es el método utilizado para gobernar un dispositivo teleoperado, mientras que los canales de comunicación son los medios inalámbricos que se utilizan para el envío y recepción de las señales del robot que se va a controlar.

- **Sensores de un sistema teleoperado**

Conjunto de elementos de entrada, que reciben señales físicas externas y las convierten en señales eléctricas para que puedan ser interpretadas por el computador, de manera que se pueda tomar una decisión.

En la Figura 7 se presentan los elementos de un sistema de teleoperación, señalando la manera en que los sensores interactúan con el control computarizado para realizar la teleoperación de un dispositivo a distancia.

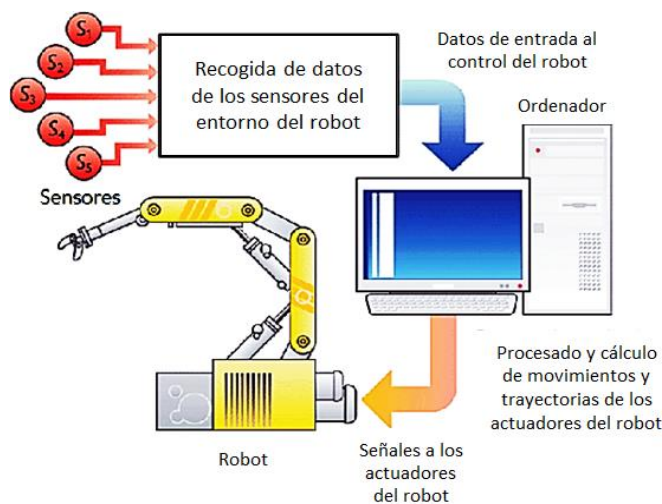


Figura 7. Sensores en un sistema de teleoperación

Fuente: (Rodríguez, 2012)

2.2.2. Métodos de control en teleoperación

El método de control es uno de los aspectos más importantes en la teleoperación, según (Ollero Baturone, Robótica: manipuladores y robots móviles, 2001) los objetivos de diseño más importantes son:

- Hacer que el control sea lo más robusto posible. Al ser un control manual se puede tener errores en la respuesta de los actuadores, datos erróneos adquiridos por los sensores e incluso errores de operación humana. De manera que al ser un sistema robusto tiene pocas posibilidades de generar fallos al momento de la teleoperación.
- Debe poseer elevadas prestaciones en cuanto a tiempo de teleoperación ideal, impidiendo que exista retardo en la comunicación y asegurando alta precisión y comodidad para el operador debido a que la experiencia de manipulación no debe ser complicada ni molesta, ya que afecta directamente a su desempeño.

El control en un sistema de teleoperación funciona de acuerdo a la comunicación maestro-esclavo. Es decir, se compone de un robot o elemento maestro manipulado por un operador y un robot o elemento remoto o esclavo cuyo propósito es interactuar con el entorno de acuerdo a las instrucciones dadas por el maestro. La finalidad del sistema es brindar al operador el mayor grado posible de telepresencia permitiéndole realizar sus actividades a distancia como si estuviera directamente en el entorno.

Tomando en cuenta los objetivos de control detallados, existen tres tipos de control relevantes en teleoperación que se detallan a continuación:

- **Control unilateral**

Fue el primer tipo de control aplicado a los sistemas teleoperados. La comunicación tiene un solo sentido, el maestro realiza el control sobre el esclavo enviando la información para que ejecute las acciones, sin embargo, no existe una retroalimentación del esclavo hacia el maestro. Por tanto, es un sistema de control en lazo abierto. En la Figura 8 se puede observar un esquema de control teleoperado unilateral.

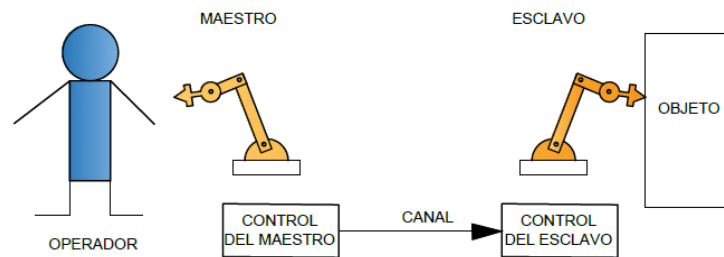


Figura 8. Esquema de control teleoperado unilateral

- **Control bilateral**

Según (Sierra & Pillajo, 2014) en el control bilateral, el elemento que actúa como maestro genera señales de posición o velocidad, conocidas como señales de referencia, que son enviadas a bucles de control de los actuadores del esclavo. En un sistema de control bilateral existen variables de control en sentido maestro-esclavo y viceversa, como se observa en el esquema de la Figura 9.

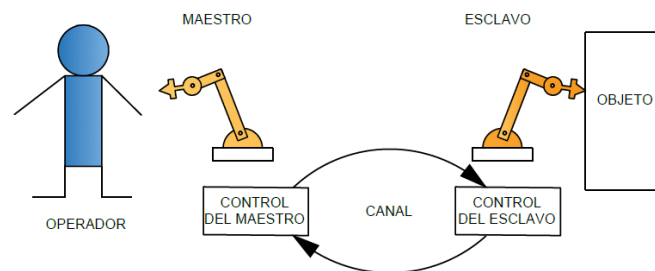


Figura 9. Esquema de control teleoperado bilateral

En el control bilateral existe realimentación de esfuerzos al usuario que manipula al robot. El método más utilizado es la realimentación cinestésica, en la cual el sistema convierte la fuerza generada por el esclavo en una fuerza aplicada al control del operario, es decir a través de sensaciones y movimientos se puede conocer la posición y funcionamiento del elemento teleoperado. El sistema descrito presenta algunos problemas, debido a que el esclavo debe seguir las acciones realizadas por el maestro y al momento de la comunicación bilateral existe la posibilidad de presentar retrasos en los tiempos de respuesta.



Figura 10. Control bilateral FESTO

Fuente: (Festo, 2012)

La empresa FESTO (Festo, 2012) propone un ejemplo de control bilateral como se puede observar en la Figura 10, que presenta una arquitectura donde el control se lo realiza articulación por articulación, lo que se conoce como cinemática proporcional.

- **Control supervisado y coordinado**

El control coordinado y supervisado controla los actuadores y efectores finales del robot. Posee un lazo de control incluido en el sitio remoto, permitiendo que el que el robot esclavo funcione adecuadamente de una manera casi autónoma en ciertas ocasiones en que operador tenga problemas de comunicación con el robot y no pueda controlarlo. Sin embargo, no se tiene autonomía total del sistema, pero ayuda en gran parte al manejo seguro del mismo.



Figura 11. Control supervisado y coordinado aplicado en la medicina
Fuente: (Amate, 2014)

Un ejemplo del control supervisado aplicado en la medicina se observa en la Figura 11, el sistema posee un control háptico inalámbrico donde el control se lo realiza por medio de una cabina. El operario puede generar señales para controlar a los diferentes actuadores que posee el robot, sin embargo, en ciertos casos existe problemas por retraso en la comunicación de datos, por lo que es importante utilizar el control supervisado y coordinado de manera que se eviten al máximo las fallas considerando que el robot es utilizado para cirugías de extrema precisión (Rodríguez, 2012).

2.2.3. Aplicaciones de sistemas de teleoperación robótica

En general los sistemas de teleoperación en robótica fueron desarrollados inicialmente con la finalidad de reemplazar al ser humano en actividades peligrosas tales como manipulación de elementos explosivos o exploración en ambientes hostiles (Ortiz Pámanez, 2014). Sin embargo, en la actualidad se han desarrollado diversas aplicaciones como se presenta a continuación:

- Actividades espaciales tales como exploraciones planetarias, mantenimiento y reparación de satélites, etc., considerando que todas las operaciones espaciales implican un alto riesgo para el ser humano. En la Figura 12 se puede observar el robot teleoperado K10 desarrollado por la NASA para realizar exploraciones en la superficie lunar.

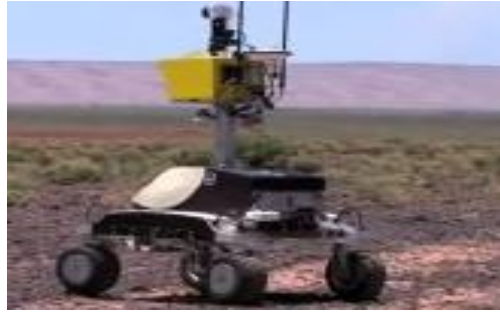


Figura 12. Robot para exploraciones lunares

Fuente: (National Aeronautics and Spacial Administration-NASA, 2009)

- En la industria nuclear existen numerosas aplicaciones de la teleoperación robótica debido a la necesidad de manipulación de sustancias radiactivas y desplazamiento en entornos contaminados.
- Aplicaciones submarinas tales como inspección, minería submarina, etc.
- Aplicaciones militares cuentan con aviones o vehículos terrestres teleoperados que pueden alcanzar objetivos militares, con la finalidad de defensa nacional. Adicionalmente existen sistemas diseñados para asegurar y desactivar bombas. En la Figura 13 se puede observar el avión teleoperado Fulmar X desarrollado por Thales Group, con la finalidad de realizar vigilancia fronteriza para monitoreo de tráfico ilegal.



Figura 13. Avión teleoperado para aplicaciones militares

Fuente: (Air Force Technolgy, 2016)

- Aplicaciones médicas en las que se utilizan para realizar diagnósticos e incluso cirugías.

2.3. Robots de Telepresencia

Los robots de telepresencia son usados con el fin de hacer dinámica la comunicación con otras personas, generalmente utilizan controles en tiempo real y se ayudan de la visión por computador para realizar tareas en lugares donde el usuario no se encuentra geográficamente (Romero Muñoz & García Villanueva, s.f.).

2.3.1. Elementos de un robot de telepresencia

Los robots de telepresencia se componen de varios elementos que permiten su funcionamiento tanto en comunicación como movilidad. Sus elementos principales se indican en la Figura 14.



Figura 14. Elementos de un robot de telepresencia
Fuente: (Forero, 2012)

- **Plataforma móvil**

Existen diferentes métodos de movilidad como ruedas, orugas, patas, etc.

- **Sistema de transmisión visual**

Generalmente se utiliza una cámara para transmitir en tiempo real, un monitor o pantalla, bocinas y micrófonos. Además, con la finalidad de evitar la pérdida información sea visible o sonora se pueden utilizar actuadores y sensores adicionales para dar la capacidad de abrir puertas, subir escaleras, etc.

- **Medio de comunicación con el exterior**

Existen dos medios de comunicación: alámbrico e inalámbrico, siendo el último el más usado por las prestaciones que ofrece, una de ellas es la versatilidad para alcanzar grandes distancias. Se utiliza conexión por radiofrecuencia, wifi, ente otras vías de comunicación para que el usuario pueda conectarse al robot y operarlo desde cualquier parte del mundo, sin la necesidad de estar cerca del dispositivo.

- **Una computadora o un controlador en el dispositivo**

Sirve para realizar las comunicaciones, el control del robot y el procesamiento de las señales de los sensores y la información que se envía desde el control remoto.

- **Baterías**

Dan autonomía y evitan que el sistema tenga una conexión directa que pueda presentar inconvenientes por cables o corte energético, que afectarían directamente al movimiento.

2.4. **Sistemas de visión artificial empleados en la Robótica**

Actualmente, existe un amplio campo de aplicaciones para los sistemas de visión artificial. En las industrias, su utilización incrementa la calidad y seguridad de los procesos de fabricación. A continuación, en la .

Tabla 1 se describen los diferentes campos donde se aplican sistemas de visión artificial.

Tabla 1

Aplicaciones de la visión artificial

| Área | Aplicación |
|--------------------|---|
| Control de calidad | -Inspección de productos -Identificación de piezas -Etiquetado |
| Robótica móvil | -Identificación de terrenos -Reconocimiento de obstáculos -Detección de objetos |

CONTINÚA →

| | |
|-------------------------------------|---|
| Biomedicina | -Detección de rostros -Análisis de imágenes de microscopía |
| Astronomía | -Resonancias magnéticas, tomografías, etc. |
| Control de tráfico | -Exploración del espacio -Reconocimiento de matrículas de automóviles -Tráfico viario |
| Meteorología y geología | -Predicción del tiempo -Detección de movimientos de terreno |
| Agricultura e industria alimenticia | -Control de plantaciones -Clasificación de productos |
| Seguridad y Defensa | -Seguimiento de objetivos -Vigilancia por satélites |

En la Figura 15 se indica una aplicación de los sistemas de visión artificial, denominado “Next Generation Identification System” utilizado por el FBI para reconocimiento facial con la finalidad que la policía local pueda identificar fácilmente a las personas.

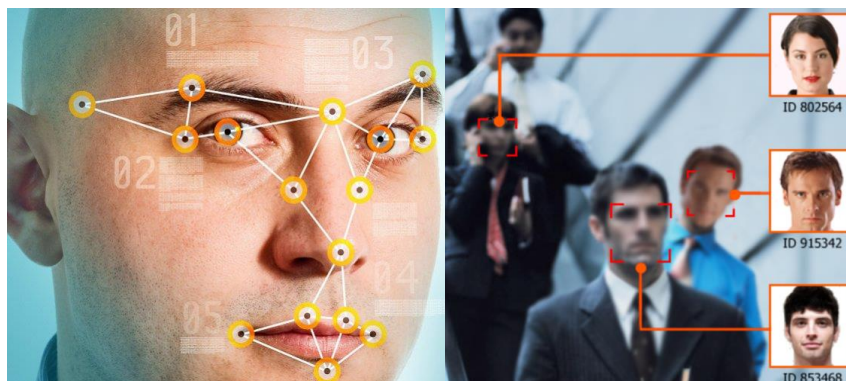


Figura 15. Sistema de reconocimiento facial utilizado por FBI
Fuente: (García, 2017)

2.4.1. Introducción a la visión artificial

La visión artificial forma parte de la inteligencia artificial y permite extraer, procesar y analizar información del mundo físico a partir de imágenes digitales mediante la utilización de un computador. Su objetivo es obtener información relevante acerca de las características visuales de alguna imagen. Dotar a un robot de un sistema de visión artificial le permite obtener información

geométrica y cualitativa de su entorno a partir del procesamiento digital de una imagen y sin interacción directa con el medio físico (García, 2017).

Un sistema de visión artificial se encarga de realizar un procesamiento similar a la visión del ser humano, en el cual la cámara sustituye al ojo humano y el computador se encarga de parametrizar la imagen para detectar la presencia o ausencia de objetos, medir sus dimensiones físicas y reconocer sus características (Monsó, 2001).

2.4.2. Etapas de un sistema de visión artificial

Un sistema de visión artificial consta de funciones específicas de acuerdo a cada aplicación, sin embargo, se definen 4 etapas comunes en cualquier proceso para conseguir la descripción de una imagen (ver Figura 16):

- **Captura:** consiste en la adquisición de imágenes digitales mediante técnicas fotográficas.
- **Preprocesamiento:** se mejorará la calidad de la imagen, destacando las características importantes, mejorando la relación señal-ruido, transformaciones geométricas, etc.
- **Segmentación:** consiste en reducir la cantidad de información en la imagen, es decir aislar los elementos significativos.
- **Reconocimiento:** se encarga de distinguir las imágenes segmentadas, de manera que los objetos puedan ser identificados y clasificados según sus características.

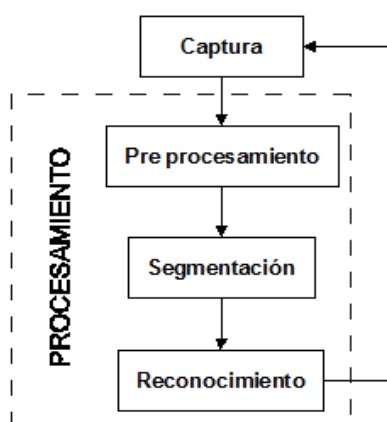


Figura 16. Etapas del sistema de visión artificial
Fuente: (Valencia & Idrovo, 2017)

2.4.3. *Visión artificial aplicada al reconocimiento de rostros*

El reconocimiento facial es un proceso en cual se identifica a una o varias personas en imágenes o video a través de la comparación de características específicas. Consiste en extraer ciertos patrones del rostro que se comparan con la información almacenada en una base de datos con la finalidad de obtener la mejor coincidencia. Los sistemas de reconocimiento facial son típicamente utilizados en sistemas de seguridad e incluso para interacción social.

En el reconocimiento facial se busca extraer las características faciales relevantes en una imagen para posteriormente clasificarlas (MathWorks, 2017). Para ello existen varios métodos que pueden ser utilizados de acuerdo al tipo de datos y las técnicas de análisis como se indica en la Tabla 2 (Vásquez López, 2014).

Tabla 2

Métodos para reconocimiento de acuerdo al tipo de datos

| Enfoque del método | Nombre del método | Características |
|---------------------------|--------------------------|---|
| Según el tipo de datos | Mapas de intensidad | -Análisis digital del rostro en 2D -Sensibilidad a cambios de perspectiva, escala, iluminación, etc. |
| | Mapas de profundidad | -Análisis digital del rostro en 3D, profundidad y geometría |

CONTINÚA →

| | | |
|---|---|---|
| Según la técnica de análisis (métodos holísticos) | Análisis de componentes principales (PCA) | -Técnica estadística de síntesis de datos -Matriz de covarianza de un conjunto de rostros de entrenamiento -Se realiza el reconocimiento mediante un proceso de comparación |
| | Análisis de componente independiente (ICA) | -Base no ortogonal para representar rostros -Los rostros proyectados son estadísticamente independientes |
| | Análisis de características locales (LFA) | -Busca grupos de características correlacionadas -Robusto frente a variaciones de iluminación o perspectiva |
| | Redes neuronales (NN) y máquinas de vectores de soporte (SVM) | -Algoritmo de aprendizaje automático -Busca construir un modelo a partir de un conjunto de datos de entrenamiento -Mayor recurso computacional |

Para reconocer un rostro se deben realizar cuatro pasos principales que se describen a continuación:

Preprocesamiento de la imagen

Debido a que cada imagen tomada de una misma persona puede variar en cuanto a iluminación, perspectiva y tamaño del rostro, es importante realizar un preprocesamiento de la imagen, que consiste en extraer la información relevante del rostro, normalizar su tamaño y aplicar filtros que permitan una mejor delimitación de los elementos de la Figura 17.



Figura 17. Preprocesamiento de una imagen

Fuente: (Ortega G. , 2017)

Extracción de características

Consiste en extraer los componentes relevantes del rostro y eliminar la información innecesaria. Adicionalmente se reconocen y determinan las distancias entre ojos, nariz, boca y cejas. (Ver Figura 18)

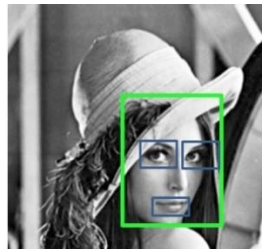


Figura 18. Extracción de componentes relevantes del rostro
Fuente: (Ortega G. , 2017)

Entrenamiento

Utiliza cualquier método que le permita aprender los rostros que forman parte del conjunto de datos de aprendizaje. El entrenamiento por redes neuronales es uno de los métodos más utilizados.

Reconocimiento

En la etapa de reconocimiento, se ingresa al sistema imágenes de rostros diferentes a las que se encuentran en la base de datos utilizadas para el entrenamiento, con la finalidad de obtener un resultado que permita identificar el rostro a partir de sus características propias.

2.4.4 Algoritmo de Viola Jones

Este algoritmo fue desarrollado por Paul Viola y Michael Jones para la detección de rostros en base a características faciales según (Espinoza & Jorquera, 2015), para ello se usan fotos en escala de grises usando 4 conceptos que se describen a continuación:

- Integral de la Imagen.
- Características de Haar.
- AdaBoost.
- Cascada de decisión.

Integral de imagen

El concepto de la integral según (Dedhia, 2015), ayuda a extraer las características de la imagen, representando en dos matrices de igual tamaño tanto a la imagen original como a la adquirida, estas matrices contienen el número de píxeles de la imagen completa.

Características de Haar

El concepto de características nos proporciona información de una zona específica y para ello realiza operaciones aritméticas, en base a características de 2,3 y 4 rectángulos según (Pavón, 2017).

AdaBoost (AdaptiveBoost)

El algoritmo Adaboost según (Espinoza & Jorquera, 2015) utiliza clasificadores que permiten realizar la extracción de características del rostro por medio de aprendizaje de máquina. De esta manera el método encuentra la mejor forma de distribuir a los clasificadores para detectar un rostro humano.

Cascada de decisión

En este concepto según (Dedhia, 2015) se utilizan clasificadores en serie para mejorar el sistema de reconociendo ya que un solo clasificador puede dar resultados equivocados, y al colocar más clasificadores el proceso continuo a la siguiente etapa solo si aprueba la etapa anterior.

Métodos de reconocimiento facial

Existen varios algoritmos para realizar el proceso de reconocimiento facial, estos se basan en dos técnicas Eigenfaces y (LBP) Local Binary Pattern

Eigenfaces

El método Eigenfaces, es un algoritmo de entrenamiento que permite extraer las características más relevantes de un rostro (Pavón, 2017), como son los ojos, nariz, boca, pómulos, frente y la distancia entre ellos. El primer paso es obtener imágenes de entrenamiento, para ello se usan fotos de personas con diferentes posiciones de su rostro y con diferentes entornos de iluminación, tomando en cuenta que las imágenes de entrenamiento deben tener el mismo tamaño en la *Figura 19* se tiene un ejemplo del proceso de entrenamiento del robot.



Figura 19. Método Eigenfaces
Fuente: (Espinoza & Jorquera, 2015)

El método no trabaja con la imagen original, primero la convierte en un vector, en donde cada pixel del vector puede tener valores desde 0 a 255, después de calcular los vectores normalizados se crea una nueva imagen, la misma es comparada con la original aplicando la fórmula de la distancia Euclidiana, por lo tanto, la imagen que tenga menor distancia es considerada como un rostro identificado, en la *Figura 20* se puede ver como se transforman las nuevas eigenfaces.



Figura 20. Imágenes generadas
Fuente: (Espinoza & Jorquera, 2015)

Local Binary Pattern

El algoritmo Local Binary Pattern según (Adams & Alegría, 2015) conocido como patrón binario locales, realiza una comparación del usuario con la base de datos, dividiendo cada píxel en 9 partes y comparando el punto central con los 8 que lo rodean, se crea una tabla binaria de los resultados de la comparación si el valor es mayor al central se coloca el valor de 1 en la matriz, pero si es menor se coloca el valor de cero, de esta manera finalmente con este método se comparan dos matrices y no dos fotos, en la *Figura 21* se puede ver el método.

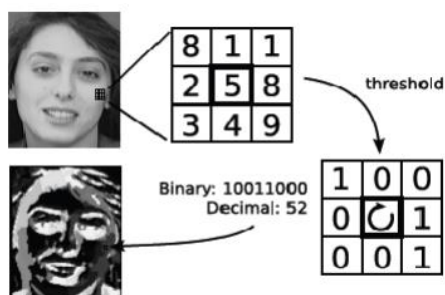


Figura 21. Vector LBP
Fuente: (Adams & Alegría, 2015)

Teniendo la matriz binaria, es evidente que al tener solo dos opciones de números que son el 0 y el 1, y como el punto central lo rodean 8 valores, se tienen como resultados 2 elevado a las 8 posibles soluciones, para ello cada valor del pixel se multiplica por el valor que contiene la matriz original para encontrar la distribución de textura obteniendo una matriz final llamada histograma, este proceso lo podemos ver en la *Figura 22*.

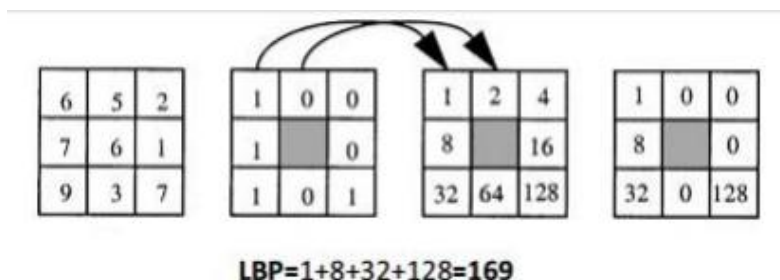


Figura 22. Cálculo de la distribución de textura

Fuente: (Adams & Alegría, 2015)

2.5. Navegación inteligente en robots móviles

La navegación en robots móviles se define como una técnica que permite el control de un robot a través de un entorno con obstáculos. Su finalidad es evitar que el robot sufra alguna colisión deteniendo al mismo y enviando una señal de alerta al usuario, por tanto, es indispensable la capacidad que posea para reaccionar ante situaciones inesperadas (Fernández, Fernández, & Valsamedas, 2010). Para lograr una navegación eficiente, es necesario considerar tres parámetros fundamentales que intervienen en cualquier arquitectura de control de navegación:

- **Percepción:** se recoge la información obtenida por los sensores de manera que el robot pueda analizarla.
- **Actuación:** se determinan las acciones de control para activar los actuadores que permitan el movimiento del robot, o desactivar los mismos para evitar la colisión.

2.6. Resumen

La telepresencia, es considerada la transmisión de la imagen de una persona, acompañada de sonido, a lugares lejanos, cuyo objetivo es suprimir la distancia geográfica entre dos o más personas, por medio de una videoconferencia o una proyección. Los sistemas de telepresencia generalmente utilizan controles dinámicos en tiempo real y utilizan visión por computador para supervisión de lugares donde el usuario no se encuentra geográficamente.

Un sistema de teleoperación, es un conjunto de elementos tecnológicos que permiten controlar un dispositivo a distancia por medio de un operario, a través de un sistema de manejo localizado en el punto de trabajo del operador. Sus principales elementos son: operador, dispositivo teleoperado, interfaz, control y sensores, los cuales son indispensables para un funcionamiento adecuado del sistema. El desarrollo de la teleoperación ha permitido que su campo de aplicación sea amplio, en áreas como robótica móvil, actividades espaciales, submarinas, militares, entre otras.

La visión artificial forma parte de la inteligencia artificial y permite extraer, procesar y analizar información del mundo físico a partir de imágenes digitales mediante la utilización de un computador. Su objetivo es obtener información relevante acerca de las características visuales de alguna imagen. Dotar a un robot con un sistema de visión artificial le permite obtener información geométrica y cualitativa de su entorno a partir del procesamiento digital de una imagen y sin interacción directa con el medio físico. El desarrollo de la visión artificial ha permitido que su campo de aplicación sea amplio en áreas como control de calidad, robótica móvil, biomedicina, astronomía, seguridad, agricultura, entre otras. Para la aplicación de reconocimiento de rostros mediante visión artificial se sigue 4 etapa: pre procesamiento, extracción de características, entrenamiento y reconocimiento.

La navegación en robots móviles es una técnica que permite a un robot trasladarse a través de un entorno con obstáculos, cuya finalidad es conducir al robot de manera segura hacia su destino, dotándolo de autonomía en su desplazamiento. La navegación inteligente se desarrolla a partir de una arquitectura de control basada en comportamientos que consiste en descomponer una tarea en módulos simples correctamente delimitados para realizar una actividad específica. Para ello es necesaria la utilización de varios sensores que permitan al robot reaccionar dinámicamente al entorno, se utiliza típicamente en entornos variables donde la posición de los obstáculos puede cambiar.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL ROBOT DE TELEPRESENCIA CONTROLADO VÍA INTERNET

El capítulo se centra en el diseño del robot de telepresencia controlado vía internet. Se parte con la descripción de la matriz QFD, para definir las necesidades del usuario y sus respectivos requerimientos técnicos con el fin de determinar los sistemas y subsistemas que representan al robot. Posteriormente se describen los diferentes conceptos y se procede a desarrollar el diseño del concepto seleccionado, se realizan el análisis de volcamiento, análisis cinemático y dinámico de la estructura. Finalmente se calcula y dimensiona los elementos que formarán parte del robot.

3.1. Matriz de calidad

La matriz de calidad define los requerimientos del cliente para su posterior análisis y establecimiento de requerimientos funcionales y técnicos. Cada uno de ellos debe ser evaluado para determinar su importancia y establecer los subsistemas correspondientes (Rojas, 2009).

3.1.1. Definición de necesidades

Se define a las necesidades como los requisitos que el cliente solicita en un producto y a partir de ellas establecer las especificaciones funcionales. Partiendo de esta definición se obtienen los sistemas y subsistemas necesarios para desarrollar un diseño adecuado que satisfaga los requerimientos del usuario. En la Tabla 3 se describe los requerimientos solicitados por el usuario.

Tabla 3

Requerimientos o necesidades del consumidor

| No. | Requerimientos |
|-----|---------------------------------|
| 1 | Facilidad de mantenimiento |
| 2 | Que el prototipo sea durable |
| 3 | Debe usar software libre |
| 4 | El prototipo debe ser económico |

CONTINÚA →

| | |
|----|---|
| | El prototipo debe poder replicarse de manera muy sencilla |
| 6 | Debe permitir la interacción con el usuario |
| 7 | El robot debe ser estético |
| 8 | El robot debe ser de fácil manejo |
| 9 | El robot no debe hacer daño a las personas |
| 10 | El robot no se debe chocar |

3.1.2. Definición de las características técnicas

Se definen a las características técnicas como la traducción de las necesidades otorgadas por el usuario en términos técnicos. En la Tabla 4 se presentan las especificaciones técnicas o funcionales, que se obtienen a partir de las necesidades del usuario.

Tabla 4

Especificaciones técnicas del proyecto

| No. | Requerimientos |
|-----|--|
| 1 | Sistema modular |
| 2 | Sistema robusto |
| 3 | Software de programación de acceso libre |
| 4 | Precio económico |
| 5 | Información adecuada para replicar |
| 6 | Uso de normas para el diseño de la HMI |
| 7 | Materiales y geometría del robot |
| 8 | Manejo intuitivo |
| 9 | Seguridad industrial |
| 10 | Sistema de navegación inteligente |

3.1.3. QFD

La matriz de calidad, conocida también como matriz QFD, “Quality Function Deployment”, es comúnmente utilizada en el desarrollo de proyectos, ya que permite relacionar los requerimientos del cliente con los requerimientos técnicos. Además, permite realizar una ponderación en función de la importancia de cada necesidad dando como resultado un enfoque adecuado de las necesidades más relevantes (Yacuzzi, 1997).

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Requerimientos de cliente | Weight / Importance | Columna # | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------|-----------------|---------------------|--|---------------------|--|-----------------|--|------------------|------------------------------------|--|----------------------------------|------------------|----------------------|-----------------------------------|
| | | | | | | Dirección de mejora Minimizar (▼), Maximizar (▲), No aplica (x) | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | | | | X | ▲ | ▲ | ▲ | X | ▲ | ▲ | X | X | |
| | | | | | | Sistema modular | Sistema robusto | Software de programación de acceso libre | Precio económico | Información adecuada para replicar | Uso de normas para el diseño de la HMI | Materiales y geometría del robot | Manejo intuitivo | Seguridad industrial | Sistema de navegación inteligente |
| 1 | 9 | 12,5 | 4,0 | Facilidad de mantenimiento | 5 | ○ | ○ | | ○ | ▲ | | ○ | ○ | | |
| 2 | 9 | 12,5 | 4,0 | Durable | 4 | ▲ | ○ | | | ○ | | ○ | | ▲ | |
| 3 | 9 | 6,3 | 2,0 | Software libre | 4 | | | ○ | ▲ | | | | ○ | | |
| 4 | 9 | 3,1 | 1,0 | Debe ser económico | 3 | | | ○ | ○ | | | ○ | | | |
| 5 | 9 | 6,3 | 2,0 | Fácil de replicar | 4 | ○ | | | | ○ | | ▲ | ○ | | |
| 6 | 9 | 3,1 | 1,0 | Debe permitir la interacción con el usuario | 3 | | | ▲ | | | ○ | | ○ | | |
| 7 | 9 | 12,5 | 4,0 | Estético | 3 | ▲ | ○ | | | | | ○ | | | |
| 8 | 9 | 12,5 | 4,0 | Fácil manejo | 4 | | | ○ | | | | | ○ | | ○ |
| 9 | 9 | 15,6 | 5,0 | No debe hacer daño a las personas | 4 | | ○ | | | | | | | ○ | |
| 10 | 9 | 15,6 | 5,0 | No se debe chocar | 4 | | ○ | | ○ | | | ○ | | | ○ |
| | | | | Puntuación | | 193 | 281 | 125 | 118 | 106 | 28 | 344 | 215 | 153 | 253 |
| | | | | Rango Relativo | | 5 | 3 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 | 4 | 6 | 2 |
| | | | | Dificultad (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | 4 | 5 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| | | | | Max Relationship Value in Column | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| | | | | Weight / Importance | | 193,8 | 281,3 | 125,0 | 118,8 | 106,3 | 28,1 | 343,8 | 215,6 | 153,1 | 253,1 |
| | | | | Relative Weight | | 10,7 | 15,5 | 6,9 | 6,5 | 5,8 | 1,5 | 18,9 | 11,9 | 8,4 | 13,9 |

Figura 23. Matriz QFD del proyecto

En la Figura 23 se puede observar la matriz de calidad, que relaciona las necesidades otorgadas por el cliente con las necesidades técnicas. Así mismo, en la Tabla 5 se muestran la ponderación e importancia de las mismas de mayor a menor.

Tabla 5*Resultados de la matriz QFD*

| Hito | Características Técnicas | Puntuación |
|-------------|--|-------------------|
| 1 | Material y geometría del robot | 344 |
| 2 | Sistema de navegación inteligente | 253 |
| 3 | Sistema robusto | 281 |
| 4 | Manejo intuitivo | 215 |
| 5 | Sistema modular | 193 |
| 6 | Seguridad industrial | 153 |
| 7 | Software de programación de acceso libre | 125 |
| 8 | Precio económico | 118 |
| 9 | Información adecuada para replicar | 106 |
| 10 | Uso de normas para el diseño de la HMI | 28 |

3.2. Factibilidad y planeación

3.2.1. Estructura funcional

Los resultados de la matriz QFD, son organizados en función de su importancia, se pueden agrupar las características que tengan relación entre sí, para crear los subsistemas del proyecto. Los subsistemas permiten facilitar el análisis, ensamblado y pruebas del proyecto a desarrollar. Para desarrollar el robot de telepresencia, se establecen los subsistemas especificados en la Tabla 6.

Tabla 6*Subsistemas definidos para el diseño*

| No. | Subsistema | Funciones | Hitos que cumplir |
|------------|---|---|--------------------------|
| 1 | Base del Robot de telepresencia | Desplazamiento y ajuste de altura del robot | 1,2,5,7 |
| 2 | Sistema de movimiento giratorio para la pantalla y cámara | Orientación de la perspectiva para la videollamada | 1,2,5,7 |
| 3 | Suministro de energía | Proporciona energía a todo el sistema electrónico del robot | 1,2,5,7 |
| 4 | Comunicación | Intercambio de datos entre el robot y el usuario | 3,4,6,8 |
| 5 | Sistema de visión artificial | Reconocimiento de rostros. | 3,4,6,8 |
| 6 | Interfaz Humano - Máquina | Interacción del usuario con el robot | 3,4,6,8 |

El proceso de diseño de un producto según (Rod, 2014), presenta dos etapas:

- Diseño Preliminar: Etapa en la que se enumeran, evalúan y seleccionan las alternativas de diseño.
- Diseño Final: Etapa donde se desarrollan las alternativas seleccionadas.

Para el desarrollo del proyecto se consideran el diseño mecánico, electrónico, de control y de software. En la etapa previa al diseño se consideran varios conceptos, los cuales se indican en la

Tabla 7.

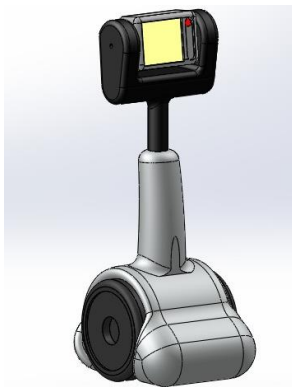
Tabla 7

Conceptos de la estructura del robot, 3 posibles soluciones

| No | Concepto | Características |
|----|---|--|
| 1 |  | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema fijo de posicionamiento de la cámara • Sistema de transmisión de dos motores, y rueda de apoyo, para navegación estable. • Prototipo medianamente liviano. • Sensores de distancia delantero superior. |
| 2 |  | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de posicionamiento vertical, mediante servomotores. • Sistema fijo de posicionamiento de la cámara • Prototipo medianamente pesado. • Sistema de transmisión de cuatro motores • Sensores de distancia delanteros y laterales. |

CONTINÚA →

3



- Sistema de posicionamiento vertical
- Sistema de orientación de la cámara.
- Sistema de transmisión de dos motores y rueda de apoyo.
- Prototipo liviano.
- Sistema modular.
- Sensores de distancia delanteros, superiores y posteriores.

3.3. Subsistema 1. Base del robot de telepresencia

El subsistema está constituido por el bastidor del robot que soporta el peso total del mismo. Incluye diferentes componentes que permiten el desplazamiento en su entorno y la regulación de altura para la pantalla, así como cámaras ubicadas en la parte superior del robot.

3.3.1. Modelamiento dinámico.

El modelamiento dinámico permite relacionar el giro de cada rueda con el momento de torsión aplicado por cada motor. Para el análisis se consideran las ruedas como discos rígidos de masa m y el cuerpo del robot con masa M . Se inicia estableciendo las restricciones descritas a continuación:

- Los ejes de desplazamiento son perpendiculares a la superficie de trabajo
- Se asume que no existe deslizamiento entre la superficie y las ruedas
- La estructura del robot es totalmente rígida, es decir no se consideran partes flexibles

Para realizar el modelamiento dinámico es necesario realizar un análisis cinemático, para lo cual se considera la Figura 24 y se define las siguientes variables:

- r_i, r_d = radio de las ruedas izquierda y derecha respectivamente.

- l = distancia entre ruedas
- θ_i, θ_d = ángulo de giro de la rueda izquierda y derecha respectivamente
- $\dot{\theta}_i, \dot{\theta}_d$ = velocidad angular de la rueda izquierda y derecha respectivamente
- ω = velocidad angular del punto medio del vehículo
- φ = ángulo de giro del vehículo respecto al sistema de coordenadas x,y
- v = velocidad lineal del punto medio del vehículo

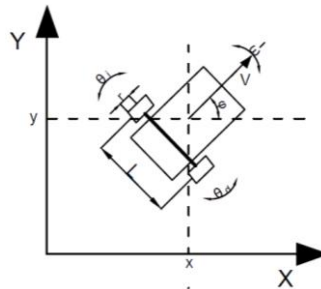


Figura 24. Configuración diferencial para el modelamiento dinámico
Fuente: (Ramirez, 2013)

Para el modelamiento dinámico se utiliza el método de Euler-Lagrange. El cual expresa en la ecuación (3.1):

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau \quad (3.1)$$

Donde:

- q, \dot{q} = vectores de estado
- τ = vector de fuerzas y pares aplicados a las coordenadas generalizadas
- $L(q, \dot{q})$ = Lagrangiano, que se define como $L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q)$

La energía cinética del robot se expresa como la sumatoria de la energía cinética del cuerpo K_c y las energías cinéticas de las ruedas K_{ri} y K_{rd} , como se expresa en la ecuación (3.2).

$$K = K_c + K_{ri} + K_{rd} \quad (3.2)$$

Donde K_c representa la energía cinética debida a la velocidad lineal (traslación) y la energía cinética debida a la velocidad angular (rotación) como se indica en la ecuación (3.3):

$$K_c = \frac{1}{2}M \times v^2 + \frac{1}{2}I_c \times \omega^2 \quad (3.3)$$

Donde I_c es el momento de inercia del cuerpo del robot con respecto al centro de giro y se define como se muestra en la ecuación (3.4).

$$I_c = \frac{1}{2}M \times l^2 \quad (3.4)$$

La energía cinética de cada rueda viene dada por las ecuaciones (3.5) y (3.6)

$$K_{ri} = \frac{1}{2}I_r \times \dot{\theta}_i^2 \quad (3.5)$$

$$K_{rd} = \frac{1}{2}I_r \times \dot{\theta}_d^2 \quad (3.6)$$

Donde I_r es el momento de inercia de cada rueda que viene dado por la ecuación (3.7).

$$I_r = \frac{1}{2}m \times r^2 \quad (3.7)$$

Se reemplaza las ecuaciones anteriores en la ecuación (3.2) para obtener K en la ecuación (3.8)

$$K = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{4}Ml^2\omega^2 + \frac{1}{4}mr^2\dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{4}mr^2\dot{\theta}_d^2 \quad (3.8)$$

Al considerar al robot como un cuerpo rígido, la velocidad lineal del centro de masa se obtiene por el promedio de las velocidades lineales de sus extremos (donde se encuentran las ruedas). Por tanto, se define la velocidad lineal del robot en la ecuación (3.9) y la velocidad angular en la ecuación (3.10).

$$v = \frac{r(\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_d)}{2} \quad (3.9)$$

$$\omega = \frac{r(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_d)}{l} \quad (3.10)$$

Se reemplazan las ecuaciones (3.9) y (3.10) en la ecuación (3.18) y se obtiene la ecuación (3.11)

$$K = \frac{r^2}{8}(3M + 2m)(\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_d^2) - \frac{Mr^2}{4}\dot{\theta}_i\dot{\theta}_d \quad (3.11)$$

Se reemplazan las variables con los valores que se tiene como datos y se obtiene el siguiente resultado:

- Masa total del robot $M_T = M + 2m = 35 \text{ kg}$
- Masa de las ruedas $m = 3 \text{ kg}$
- Masa total del robot $M = M_T - 2m = 29 \text{ kg}$
- Radio de la rueda $r = 0.11 \text{ m}$

$$K = 0.1406(\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_d^2) - 0.088\dot{\theta}_i\dot{\theta}_d$$

Para el análisis de la energía potencial se asume que el terreno donde se moviliza el robot no es completamente uniforme ni horizontal, para lo cual se considera un ángulo α de inclinación del plano y los parámetros de la Figura 25. La energía potencial del robot se expresa en la ecuación (3.12).

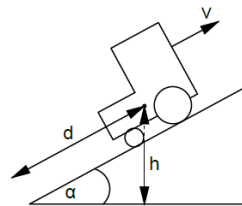


Figura 25. Parámetros del movimiento
Fuente: (Ramirez, 2013)

$$U = M_T gh \quad (3.12)$$

Donde $h = d \sin(\alpha)$

Por lo tanto, es necesario definir d en función de los estados θ_i, θ_d sabiendo que $d = \int v$. A partir de la ecuación (3.9) se determina:

$$d = \int_{t_0}^{t_1} \frac{r(\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_d)}{2} dt$$

$$d = \frac{r}{2} \int_{t_0}^{t_1} (\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_d) dt \quad (3.13)$$

Se utiliza la representación $d = \frac{r}{2} f(\theta_i, \theta_d)$, donde $f(\theta_i, \theta_d) = \int_{t_0}^{t_1} (\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_d) dt$ para reemplazarla en la ecuación (3.12), con los datos previos, se obtiene la ecuación (3.14):

$$U = M_T g \times \frac{r}{2} f(\theta_i, \theta_d) \times \sin(\alpha)$$

$$U = 18.88 \sin(\alpha) f(\theta_i + \theta_d) \quad (3.14)$$

Posteriormente se obtiene el Lagrangiano de la ecuación 3.15.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q).$$

$$L = 0.1406 (\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_d^2) - 0.088 \dot{\theta}_i \dot{\theta}_d - 18.88 \sin(\alpha) f(\theta_i + \theta_d) \quad (3.15)$$

A partir de la ecuación (3.15) se aplica la ecuación de Euler-Lagrange para el estado θ_i .

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right] = 0.2812 \ddot{\theta}_i - 0.088 \ddot{\theta}_d$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = -18.88 \sin(\alpha) \frac{\partial f(\theta_i + \theta_d)}{\partial \theta_i}$$

Reemplazando en la ecuación (3.2) se obtiene la ecuación (3.16)

$$0.2812 \ddot{\theta}_i - 0.088 \ddot{\theta}_d + 18.88 \sin(\alpha) \frac{\partial f(\theta_i + \theta_d)}{\partial \theta_i} = \tau \quad (3.16)$$

Posteriormente, a partir de la ecuación (3.16) se aplica la ecuación de Euler-Lagrange para el estado θ_d .

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_d} \right] = 0.2812\ddot{\theta}_d - 0.088\ddot{\theta}_i$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_d} = -18.88 \sin(\alpha) \frac{\partial f(\theta_i + \theta_d)}{\partial \theta_d}$$

Reemplazando en la ecuación (3.2) se obtiene la ecuación (3.17)

$$0.2812\ddot{\theta}_d - 0.088\ddot{\theta}_i + 18.88 \sin(\alpha) \frac{\partial f(\theta_i + \theta_d)}{\partial \theta_d} = \tau \quad (3.17)$$

Se representan las ecuaciones (3.16) y (3.17) en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} 0.2812 & -0.088 \\ -0.088 & 0.2812 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_i \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} + 18.88 \sin(\alpha) \frac{\partial f(\theta_i + \theta_d)}{\partial \theta_d} = \begin{bmatrix} \tau_i \\ \tau_d \end{bmatrix}$$

Al obtener las ecuaciones utilizadas en el modelo dinámico, se realiza una simulación del sistema como lo indica la Figura 26. Teniendo como entradas las velocidades de cada motor y como salida el torque de cada una.

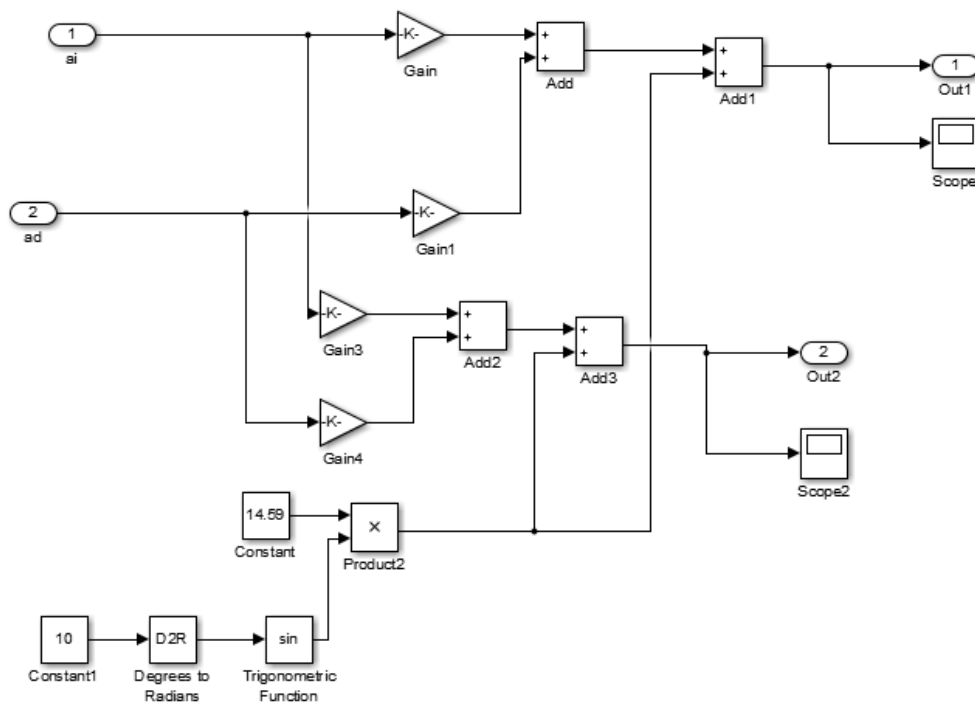
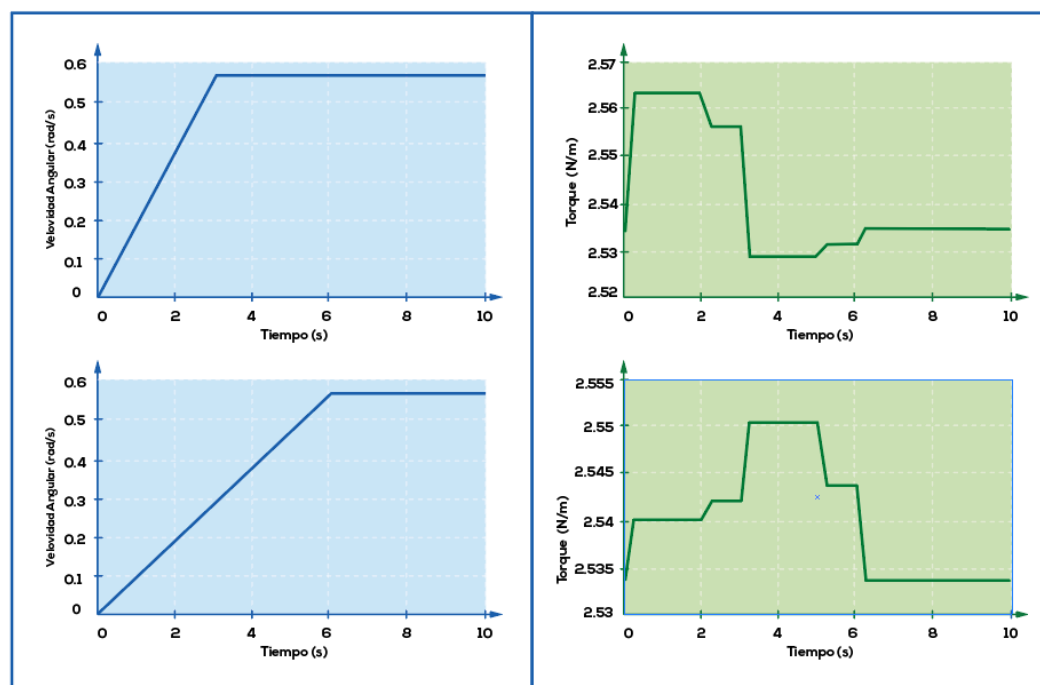


Figura 26. Diagrama de bloques del modelo dinámico

En las gráficas representadas en la Figura 27a y Figura 27b se puede observar el comportamiento de los motores con una velocidad de 0.56 m/s como entrada, obteniendo a la salida un torque máximo de 2.56 Nm necesario para contrarrestar el momento de inercia del robot.



a)

b)

Figura 27. a) Gráficas de entrada, b) Gráficas de salida de los motores DC


Al obtener las gráficas resultantes de la simulación del modelamiento dinámico, podemos concluir que se requiere de dos motores DC con un torque mínimo de 2.56 Nm, para el desplazamiento óptimo del robot.

3.3.2. Movilidad del robot

En base a los cálculos realizados tanto en el análisis estático como dinámico, se presentan tres alternativas de solución para los motores DC. En la Tabla 8 se presentan las características de 2 tipos de motores de marcas SAWAMURA y DUNKER respectivamente.

Tabla 8*Características técnicas de los motores*

| | Solución A | Solución B | Solución C |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Especificaciones | SS40-E6 | SS40-E6-D2 | GR63x55 |
| Velocidad (rpm) | 2500 | 100 | 3350 |
| Torque (Nm) | 0.24 | 2.9 | 1.5 |
| Voltaje (V) | 12 | 12 | 24 |
| Corriente (A) | 8 | 4.4 | 4.9 |
| Costo (\$) | 54 | 60 | 75 |
| Peso (kg) | 1.35 | 2.5 | 1.7 |



En base a la selección realizada en el Anexo A, se puede observar en la Tabla 9 el resultado del proceso de selección donde se concluye que la solución B presenta mayores prestaciones de acuerdo a los requerimientos del proyecto, por lo tanto, se selecciona el motor SAWAMURA SS40-E6-D2.

Tabla 9*Conclusión de la selección del tipo de motor DC*

| Criterio | Velocidad | Torque | Peso | Costo | Σ | Prioridad |
|-----------------|------------------|---------------|--------------|--------------|----------|------------------|
| Solución A | 0.051 | 0.019 | 0.212 | 0.051 | 0.333 | 2 |
| Solución B | 0.094 | 0.212 | 0.019 | 0.094 | 0.419 | 1 |
| Solución C | 0.009 | 0.115 | 0.115 | 0.009 | 0.248 | 3 |
| | | | Total | | 1.000 | |




3.3.3. Controlador de motores DC

El robot tiene una configuración diferencial con una rueda de apoyo por ello requiere de un controlador para su movimiento, el cual permita regular la velocidad y sentido de giro de forma

independiente. En la Tabla 10 se describen las características de dos tipos de controladores, de las marcas SPARKFUN y SABERTOOTH.

Tabla 10

Especificaciones técnicas de los controladores para motor

| | Solución A | Solución B | Solución C |
|----------------------------------|---|--|---|
| Especificaciones | SparkFun Monster Motor Shield | Sabertooth 2x25 V2 Motor Shield | MD03 S310110 Motor Shield |
| Voltaje de entrada (V) | 16 | 6 – 30 | 5 - 24 |
| Corriente de salida (A) | 30 | 50 | 20 |
| Corriente continua por canal (A) | 14 | 25 | 18 |
| Costo (\$) | 70 | 125 | 45 |
| |  |  |  |

En base a los resultados del Anexo A, se puede observar en la Tabla 11 el proceso de selección para el controlador de los motores DC, por lo tanto, el controlador que se ajusta a los requerimientos solicitados es el SABERTOOTH 2x25 V2.

Tabla 11

Conclusión de la selección del tipo de driver para el motor DC

| Criterio | Voltaje de entrada | Corriente de salida | Corriente por canal | Costo | Σ | Prioridad |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|----------|------------------|
| Solución A | 0.022 | 0.018 | 0.108 | 0.088 | 0.237 | 2 |
| Solución B | 0.040 | 0.199 | 0.199 | 0.015 | 0.453 | 1 |
| Solución C | 0.022 | 0.108 | 0.018 | 0.162 | 0.310 | 3 |
| | | | | Total | 1.000 | |


3.3.4. Sistema de regulación de altura del robot

Una de las principales características del robot es la posibilidad de regular su altura, de esta manera el usuario pueda tener una mejor perspectiva de su entorno mientras realiza la

videollamada. Para ello es necesario utilizar un actuador de desplazamiento lineal, de modo que se seleccionó el motor GLIDEFORCE LACT10P-12V-20 de la marca POLOLU cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12

Características técnicas del actuador lineal




| Modelo | Imagen | Características |
|----------------|---|---|
| LACT10P-12V-20 |  | Voltaje de funcionamiento 12 VDC Corriente de consumo máxima de 3.2 A A carga máxima, 1.2 A sin carga Distancia de alcance máxima de 25 cm Carga máxima 50kgf Clasificación IP65 |

3.3.5. Controlador del actuador lineal

El motor DC del actuador lineal requiere un módulo controlador que permita regular su desplazamiento vertical, para ello en la Tabla 13 se detallan las principales opciones.

Tabla 13

Características de las soluciones para el driver del actuador lineal

| | SOLUCIÓN A | SOLUCIÓN B | SOLUCIÓN C |
|----------------------------------|---|--|---|
| Especificaciones | L298N | Tb6612fng | L293D |
| Voltaje de entrada (V) | 6 - 35 | 4.5 - 13.5 | 4.5 - 36 |
| Corriente de salida por canal(A) | Máximo2 | Máximo1.2 | Máximo1 |
| Costo (\$) | 4.5 | 7.75 | 6 |
| |  |  |  |

En base los resultados obtenidos en el Anexo A, se selecciona el driver L298N, como se puede observar en la Tabla 14 que muestra los resultados del proceso de selección.

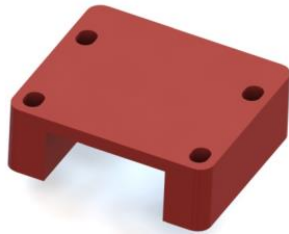
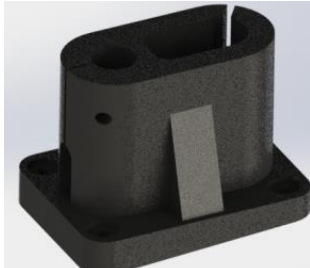
Tabla 14*Conclusión de la selección del tipo de driver para el actuador lineal*

| Criterio | Voltaje de entrada | Corriente de salida | Corriente por canal | Σ | Prioridad |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|------------------|
| Solución A | 0.065 | 0.223 | 0.204 | 0.492 | 1 |
| Solución B | 0.065 | 0.026 | 0.019 | 0.110 | 3 |
| Solución C | 0.065 | 0.223 | 0.111 | 0.399 | 2 |
| | | | Total | 1.000 | |

3.3.6. Análisis estático de diseños

Se realizó un análisis estático en los elementos de la Tabla 15 para conocer la reacción de cada uno según la fuerza aplicada.

Tabla 15*Análisis estático de los elementos del robot*

| Elemento | Análisis estático |
|---|--|
|  | <p>Base de Motor</p> <p>Esfuerzo Von Mises: $1.691 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 5.428×10^{-5} Desplazamiento Estático: $4.148 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$</p> |
|  | <p>Base de Actuador Lineal</p> <p>Esfuerzo Von Mises: $6.33 \times 10^4 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 1.818×10^{-6} Desplazamiento Estático: $6.338 \times 10^{-5} \text{ (mm)}$</p> |

CONTINÚA →



Sujetador de Actuador Lineal

Esfuerzo Von Mises: $6.547 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$

Deformación Unitaria: 2.190×10^{-4}

Desplazamiento Estático: $1.370 \times 10^{-2} \text{ (mm)}$

3.3.7. Base metálica del robot

La estructura principal está construida con acero A36 como se observa en la Figura 28, cuya función principal es ser el soporte de todo el robot. Los perfiles cumplen la función de apoyo para diferentes componentes tales como motores, batería y el sistema de regulación de altura del robot.

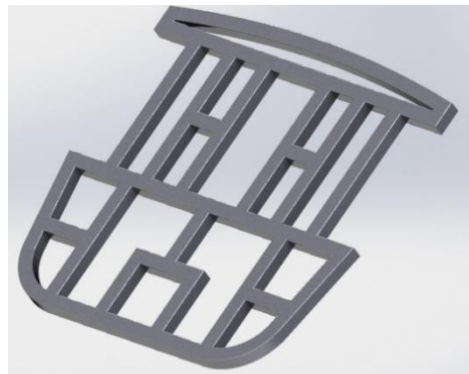


Figura 28. Base metálica de la estructura del robot

A. Cálculo para la estructura

Para la selección del material y tipo de perfil se realiza un análisis de los esfuerzos a los que se encuentra sometida la estructura. El cálculo parte del análisis de esfuerzos en la viga, tomando en cuenta la vista frontal en el plano y-z de la estructura. Se realiza el diagrama de las fuerzas y reacciones que actúan en el perfil, como indica la Figura 29.

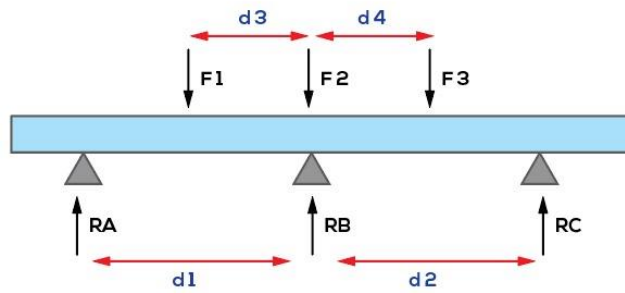


Figura 29. Diagrama de fuerzas que actúan en el perfil plano yz

Donde:

$$d1 = d2 = 0.22 \text{ m}$$

$$d3 = d4 = 0.14 \text{ m}$$

Se consideran los pesos como cargas puntuales

Motores $F1 = F3 = 24.82N$

Rueda de apoyo $F2 = (m_e + m_{bat} + m_b) \times g$

$$F2 = 180.11N$$

$$\sum M_B = 0 \quad (3.18)$$

$$-R_A \times (d_1) + F_1 \times (d_3) - F_3 \times (D_4) + R_C = 0$$

$$R_A = R_C$$

$$\sum F_Y = 0 \quad (3.19)$$

$$R_A + R_B + R_C - F1 - F2 - F3 = 0$$

$$2 \times R_A + R_B = 229.75 \quad (3.20)$$

Después se realiza el análisis de esfuerzos en la vista lateral del plano x-y como lo indica la Figura 30, donde se tienen 5 fuerzas que actúan. La F1 es el peso de la batería que está situada en

la parte posterior del robot, la F2 es el peso de la estructura del sistema de regulación de altura del robot, la F3 es el peso de la base metálica del robot, la F4 y F5 son el peso de los motores.

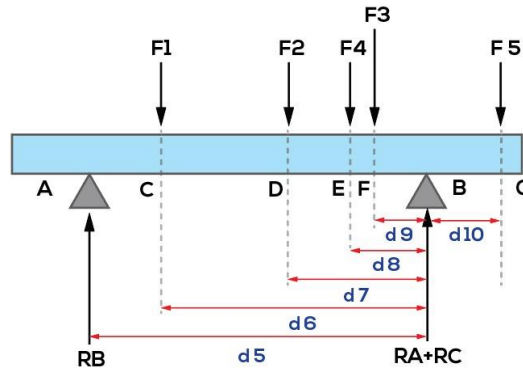


Figura 30. Diagrama de fuerzas que actúan en el perfil plano xy

En donde:

$$d_5 = 0.24, \quad d_6 = 0.19, \quad d_7 = 0.07, \quad d_8 = 0.03, \quad d_9 = 0.01, \quad d_{10} = 0.03.$$

Batería $F1 = 57.68 \text{ N}$

Base metálica $F2 = 55.92 \text{ N}$

Chasis $F3 = 66.51 \text{ N}$

Motores $F4 = F5 = 24.82 \text{ N}$

Se realiza la sumatoria de momentos en el punto B.

$$\sum M_B = 0$$

$$-R_B \times (d_5) + F1 \times (d_6) + F2 \times (d_7) + F4 \times (d_8) + F3 \times (d_9) - F5 \times (d_{10}) = 0$$

$$R_B = 64.75 \text{ N}$$

Al obtener el valor de la reacción en el punto B, usando la ecuación (3.20), encontramos el valor de la reacción en el punto A.

$$2 \times R_A + 64.75 = 229.75$$

$$R_A = R_C = 82.5 \text{ N}$$

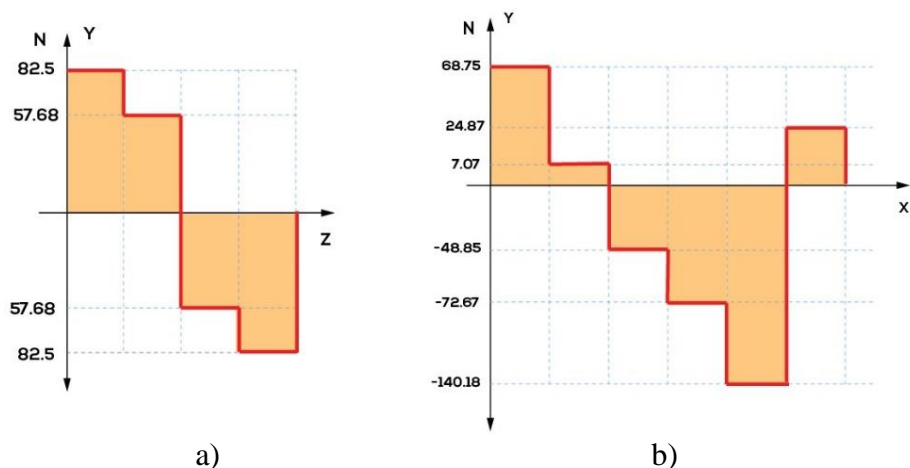


Figura 31. a) Diagramas de Fuerza Cortante a) plano yz, b) plano xy

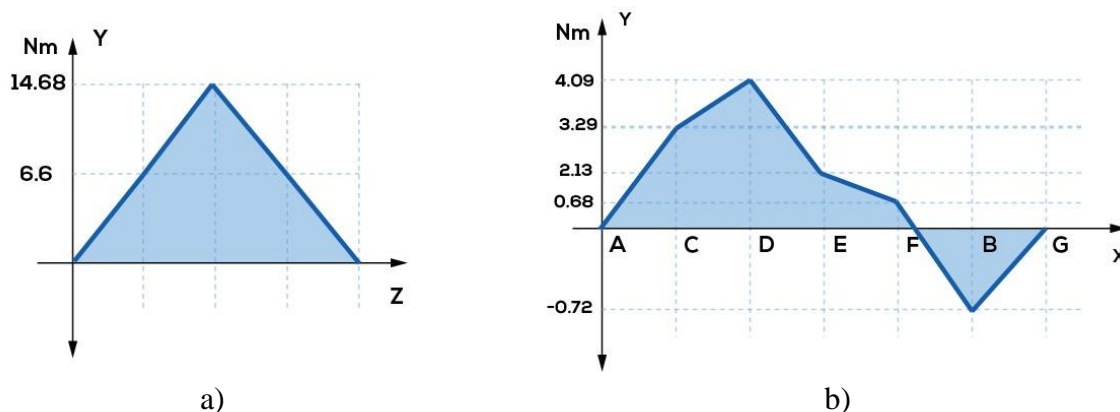


Figura 32. Diagramas de Momento Flector a) plano yz, b) plano xy

$$M_{B \text{ MAX}} = 14.68 \text{ Nm} \quad M_{D \text{ max}} = 4.04 \text{ Nm}$$

El momento máximo se encuentra en el centroide de la base, por tanto, la viga del centro es la que soporta mayores esfuerzos. Los diagramas de la Figura 31, y Figura 32 permiten realizar el análisis necesario para encontrar la sección del perfil.

$$M_{\text{maxTotal}} = \sqrt{M_{B\text{max}}^2 + M_{D \text{ max}}^2}$$

$$M_{\text{maxTotal}} = 15.24 \text{ Nm}$$

De acuerdo a los cálculos, se sugiere elegir un perfil cuadrado de acero ASTM A36

$$\sigma = \frac{M_y}{i} = \frac{M}{\frac{I}{C}} = \frac{M}{S} \quad (3.21)$$

$I =$ Inercia de la viga

$C =$ Distancia desde la línea neutra a la base más lejana

$S =$ Módulo de la sección

$$\sigma_{f1 A36} = 250 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{M}{S} \quad (3.22)$$

$$\sigma_{admi} = \frac{\sigma_{f1}}{n} \quad (3.23)$$

Sustituimos la ecuación (3.22) en la ecuación (3.23)

$$\frac{M}{S} = \frac{\sigma_{f1}}{n}$$

$$S = 0.18 \text{ cm}^3$$

Finalmente se selecciona la tubería estructural cuadrada de 20 mm de sección y 2 mm de espesor, que presenta las características indicadas en la Figura 33.

Tubería Estructural Cuadrada

| Designaciones | Área | Peso | Propiedades Estáticas | | | |
|---------------|------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|------|
| | | | Eje x-x = y-y | | | |
| | | | Momento de inercia | Módulo de resistencia | Radio de giro | |
| B | e | A | P | I | W | i |
| mm | mm | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | cm |
| 20 | 1,40 | 0,99 | 0,78 | 0,56 | 0,56 | 0,75 |
| | 1,50 | 1,05 | 0,83 | 0,58 | 0,58 | 0,75 |
| | 1,80 | 1,23 | 0,96 | 0,66 | 0,66 | 0,73 |
| | 2,00 | 1,34 | 1,05 | 0,70 | 0,70 | 0,72 |
| 25 | 1,40 | 1,27 | 1,00 | 1,16 | 0,93 | 0,95 |
| | 1,50 | 1,35 | 1,06 | 1,22 | 0,97 | 0,95 |
| | 1,80 | 1,59 | 1,25 | 1,39 | 1,11 | 0,94 |
| | 2,00 | 1,74 | 1,36 | 1,49 | 1,19 | 0,93 |

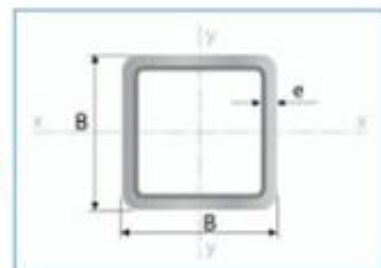


Figura 33. Características del perfil seleccionado para la base del robot

Fuente: (IPAC Duferco Group, 2014)

A partir de los datos de la viga seleccionada se calcula el factor de seguridad

Se tiene que

$$S = 700mm^3$$




$$n = 11.48$$

3.3.8. Selección del computador para el robot de telepresencia

El robot de telepresencia cuenta con un computador que se encarga de procesar la información recibida del usuario a través de internet. En la Tabla 16 se muestran las tres posibles soluciones para el computador.

Tabla 16

Características para las soluciones de la computadora

| | Solución A | Solución B | Solución C |
|--------------------------|---|--|---|
| Especificaciones | Raspberry pi 3B+ | Plátano Pi BPI-M2 + | Z-83F fanless mini PC |
| Conectividad Wifi | 2.4Ghz | 2.4Ghz | 2.4Ghz |
| Procesador | 1.4Ghz | 1Ghz | 1.4Ghz |
| Memoria RAM | 1Gb | 2Gb | 4 Gb |
| Costo | \$75 | \$180 | \$250 |
| |  |  |  |

En base a los resultados obtenidos en el Anexo A se selecciona la Raspberry pi 3 B+ debido a sus prestaciones tecnológicas, el resultado de la selección se puede ver en la Tabla 17.

Tabla 17



Conclusión de la selección del tipo de computador para el robot

| Criterio | Conectividad Wifi | Procesador | Memoria RAM | Costo | Σ | Prioridad |
|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------|----------|------------------|
| Solución A | 0.028 | 0.126 | 0.063 | 0.188 | 0.405 | 1 |
| Solución B | 0.028 | 0.073 | 0.108 | 0.017 | 0.227 | 3 |
| Solución C | 0.028 | 0.126 | 0.154 | 0.060 | 0.368 | 2 |
| | | | Total | | 1.000 | |

3.3.9. Sistema de detección de obstáculos

El robot de telepresencia, al ser controlado de forma remota puede tener inconvenientes, tales como posibles colisiones del mismo con su entorno. Debido a esto es necesaria la implementación de sensores, que permitan alertar al robot, reaccionando de manera favorable garantizando la integridad de las personas u objetos que lo rodean. En el robot se utilizó 4 sensores infrarrojos E19-D80NK, y un sensor analógico SHARP, que poseen las características que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18
Especificaciones de los Sensores Infrarrojos

| Modelo | Imagen | Características |
|---------------------|---|---|
| E19-D80NK |  | Voltaje de funcionamiento 5 VDC Corriente de consumo mínima de 5mA Corriente de consumo máxima de 100mA Detección de objetos opacos y transparentes Rango de medición de 3 a 80 cm Temperatura de funcionamiento entre -25 °C ~ 55 °C |
| Pololus60szl |  | Voltaje de funcionamiento 5 VDC Corriente de consumo 33mA Rango de medición de 10 a 150 cm Tipo de salida voltaje analógico |

Los sensores trabajan en un sistema de lazo cerrado como se muestra en la Figura 34. Los cuales ordenan al robot a detenerse al detectar alguna persona u objeto que se encuentre a una distancia menor a 40 cm, dicha señal proviene de los sensores que se encuentran ubicados en la parte inferior y superior del robot.

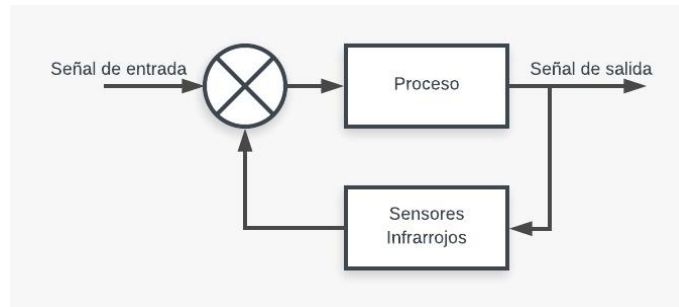


Figura 34. Funcionamiento de sensores en lazo cerrado

3.3.10. Diseño electrónico de la tarjeta de control

Para el diseño se requiere de una placa electrónica que controle los diferentes componentes del robot de telepresencia, como actuadores, sensores u otros. Es necesario realizar el cálculo respectivo del ancho de pista debido a que se manejan diferentes rangos de corrientes.

A. Cálculo de ancho de la pista

La tarjeta de control principal se encuentra en la base del robot y se encarga de recibir la información del computador y enviarla a los diferentes actuadores del robot. Para ello se realiza el cálculo del ancho de pista con los siguientes requerimientos:

- Corriente máxima: 10A
- Variación máxima de temperatura: 15 °C
- Altura: 35 micras

$$\text{Ancho de pista} = \frac{\left(\frac{1}{k_1 \times \Delta T^{k_2}}\right)^{\frac{1}{k_3}}}{1.378 \times \text{Altura}} \quad (3.24)$$

Al tener una pista externa los valores de las constantes $K_1=0.0647$, $K_2=0.4281$, $K_3=0.6732$

Reemplazando las constantes se obtiene el ancho de la pista = 231 mil. En la Figura 35 se muestra el diagrama electrónico de la placa principal y una vista en 3d el diseño final de la placa.

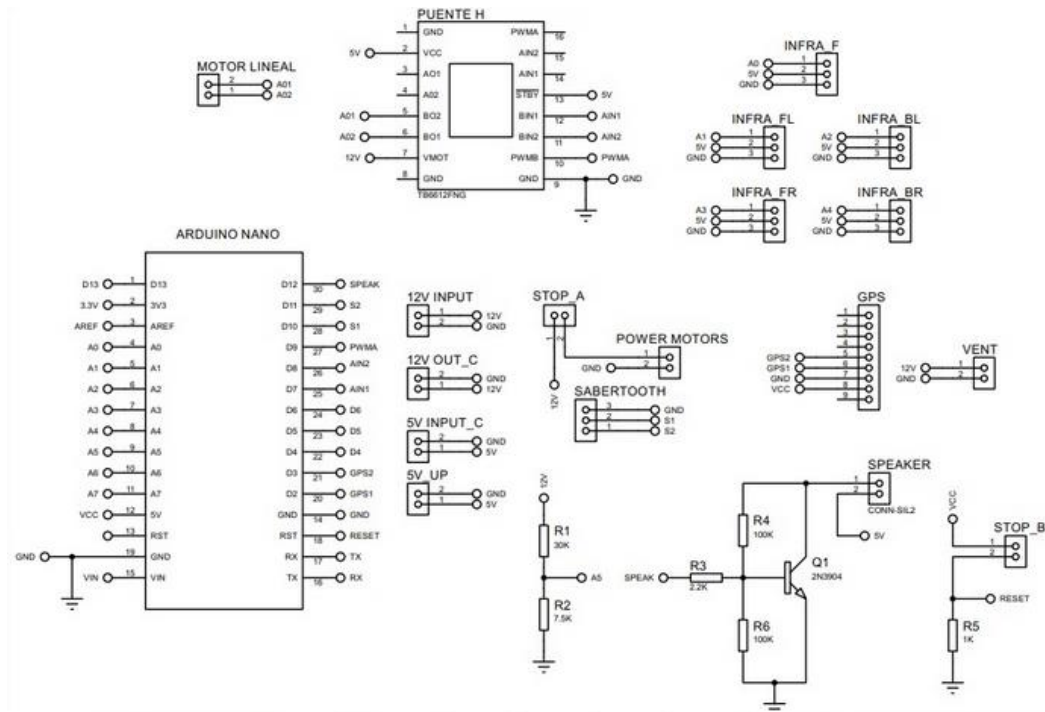


Figura 35. Esquema del circuito para la tarjeta de control principal

3.3.11. Funcionamiento del subsistema 1

El robot cuenta con sensores infrarrojos situados en la base que lo alertan de posibles obstáculos en su entorno. Además, cuenta con finales de carrera localizados en el interior del actuador lineal que desactivan el motor al alcanzar los límites máximos y mínimos del vástago móvil. En caso de presentarse un comportamiento inusual que requiere la desactivación inmediata del robot, se cuenta con un botón de paro de emergencia cuyo objetivo es cortar el suministro de energía hacia los motores y al mismo tiempo reiniciar la placa de control del robot. En el diagrama de flujo presentado en la Figura 36 se puede observar el funcionamiento del robot.

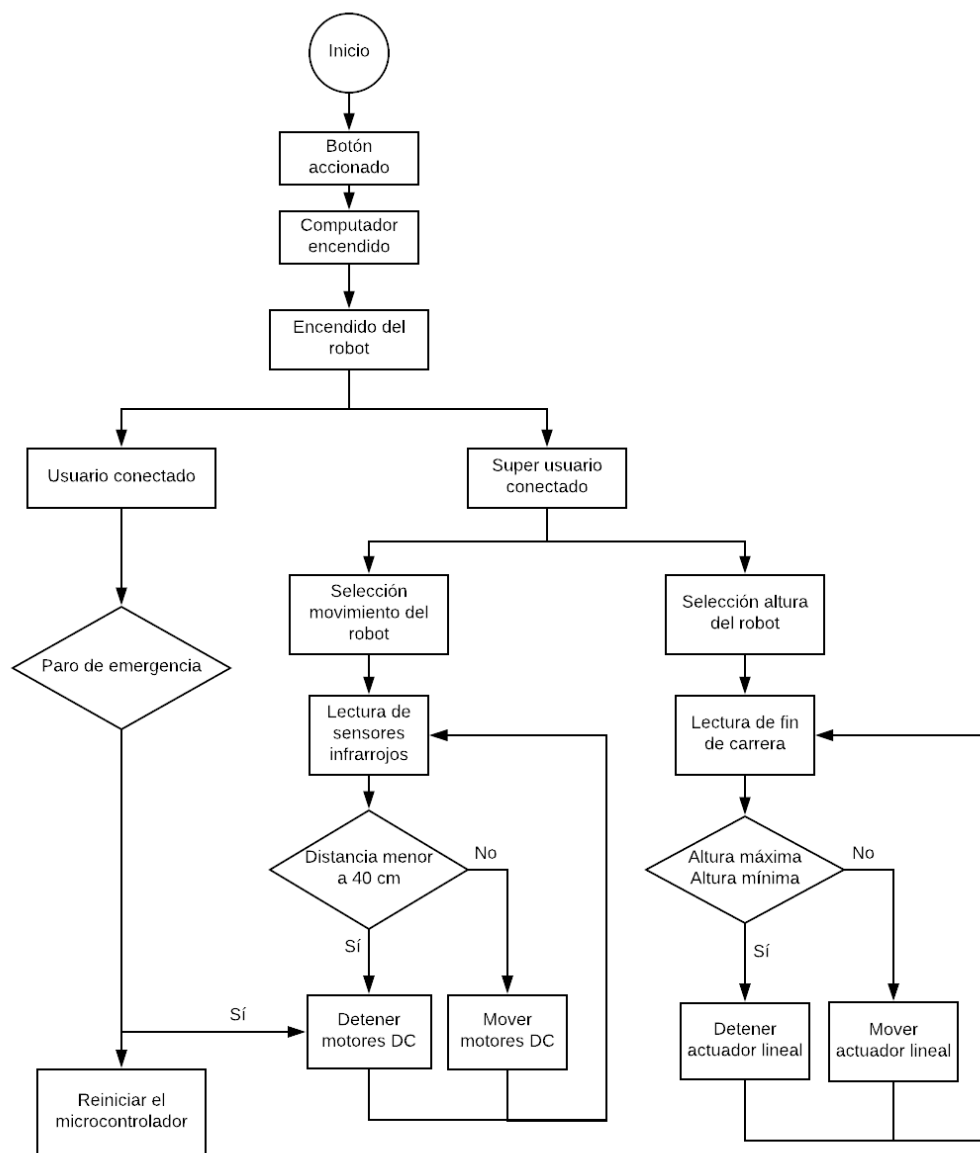


Figura 36. Diagrama de flujo del funcionamiento del robot

3.4. Subsistema 2. Sistema de movimiento para la pantalla y la cámara

El sistema de movimiento giratorio posee 2 grados de libertad, que permite al usuario, orientar tanto la pantalla como la cámara web, como se observa en la *Figura 37*, obteniendo una mejor perspectiva de visión mientras se realiza la videollamada.

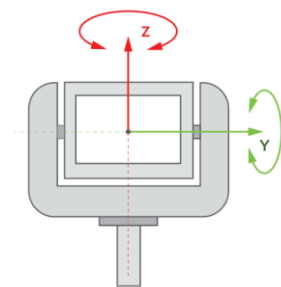


Figura 37. Mecanismo para la rotación del eje vertical

3.4.1. *Diseño del mecanismo para la rotación del eje vertical*

Se analizan las alternativas del tipo de mecanismo a utilizarse, con sus respectivas características.

3.4.1.1. *Alternativas de Diseño*

Sistema de poleas con correa

Este mecanismo se compone de dos ruedas o poleas ubicadas a una cierta distancia con sus ejes respectivamente paralelos, los mismos que permiten transmitir el movimiento circular a través de una correa conductora como se observa en la *Figura 38*. En ciertos casos se utilizan correas dentadas para evitar posibles deslizamientos con las poleas.

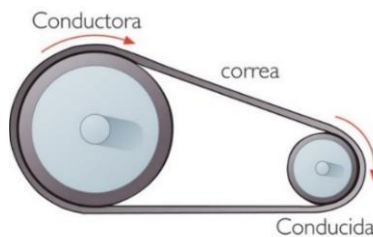


Figura 38. Sistema de poleas con correa

Fuente: (Betancur, 2011)

Características:

- Fácil montaje y desmontaje.
- Costo de fabricación reducido.

- Permiten montajes con múltiples poleas para varias aplicaciones.
- Potencia transmitida limitada.
- Ocupa un espacio grande.

Sistema de transmisión por engranajes

Este sistema de transmisión por engranajes está constituido por ruedas dentadas acopladas entre sí, transmitiendo el movimiento circular entre sus ejes, ya sean estos paralelos, oblicuos o perpendiculares, como lo indica la *Figura 39*.

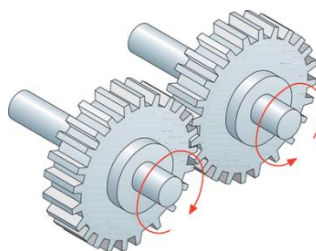


Figura 39. Sistema de transmisión por engranajes
Fuente: (Befi, 2013)

Características:

- Ocupa espacios reducidos.
- No hay deslizamiento.
- Mayor capacidad de transmisión de potencia.

Sistema de transmisión por engranaje de tornillo sin fin

Este sistema transmite el movimiento circular entre ejes que generalmente están perpendiculares entre sí. Está compuesto por dos elementos: el tornillo sin fin y la rueda dentada, esto lo podemos observar en la *Figura 40*.



Figura 40. Sistema de tornillo sin fin
Fuente: (Brettis, 2012)

Características:

- Relación de transmisión muy baja.
- Bajo rozamiento y marcha silenciosa.
- Ocupa espacios reducidos.
- Empuje axial elevado en el engranaje helicoidal.
- Requiere cojinetes adecuados en ciertos casos.




Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto se selecciona el sistema de transmisión por engranajes, debido a los factores más relevantes, como el espacio reducido de instalación, eliminación del deslizamiento, bajo costo de mantenimiento y capacidad transmisión de potencia.

3.4.2. Selección de actuadores del sistema para el eje vertical

Es importante la implementación de actuadores con tamaño reducido, que permitan el movimiento rotacional del sistema pantalla-cámara, en la Tabla 19 se presenta las posibles soluciones con sus principales características.

Tabla 19*Especificaciones para el actuador del sistema del eje vertical*

| | Solución A | Solución B | Solución C |
|-------------------------|---|---|--|
| Especificaciones | 28byj-48 | Servo mg90s | Motor DC |
| Voltaje (V) | 5 | 4.8 - 6 | 5 |
| Torque (mNm) | 29 | 176 | 4.9 |
| Angulo de giro | 360 | 180 | 360 |
| Costo (\$) | 5 | 8 | 3.5 |
| |  |  |  |

En base los resultados obtenidos en el Anexo A, se concluye que es necesario un rango elevado de rotación y que el tamaño del motor sea reducido, por lo tanto, la solución A tiene mejores prestaciones, por ende, es seleccionado el motor 28byj-48. Los resultados se pueden observar en la Tabla 20.


Tabla 20*Conclusión del motor para el sistema de rotación del eje vertical*

| Criterio | Voltaje | Torque | Ángulo de giro | Costo | Σ | Prioridad |
|-------------------|----------------|---------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------|
| Solución A | 0.030 | 0.094 | 0.246 | 0.117 | 0.487 | 1 |
| Solución B | 0.030 | 0.172 | 0.022 | 0.014 | 0.238 | 3 |
| Solución C | 0.030 | 0.016 | 0.078 | 0.151 | 0.275 | 2 |
| | | | | Total | 1.000 | |

3.4.3. Controlador de motores a paso

Para el control de los motores a paso se utilizó el driver ULN-2003 cuyas características más relevantes se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21*Especificaciones del driver para el motor a pasos*

| Modelo | Imagen | Características |
|------------------|---|---|
| ULN -2003 |  | <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de funcionamiento 5 VDC • Corriente de consumo máxima de 500 mA • Numero de fases, 4 • Frecuencia 100 Hz |

3.4.4. Cálculo del sistema de transmisión mecánica

Se requiere un sistema de 3 engranajes para transmitir el movimiento circular de la estructura que contiene la cámara web y la pantalla. El engranaje principal o rueda conducida se ubica en el perfil circular y los dos engranajes restantes actúan como conductores ubicados en los extremos del engranaje principal. En la Tabla 22 se muestra los parámetros iniciales para realizar el análisis respectivo.

Tabla 22

Datos para el cálculo de los engranajes del sistema de visión

| Datos generales | Unidad | Dimensiones |
|---|--------|-------------|
| N_{in} (Velocidad de salida del motor) | 14 | Rpm |
| N_{out} (Velocidad entregada por el sistema) | 7 | Rpm |
| Potencia del motor a paso | 4.47 | W |

$$i = \frac{N_{OUT}}{N_{IN}} \quad (3.25)$$

$$i = 0.5$$

Para el diseño de los engranajes se define que el diámetro externo máximo que puede tener, el engranaje de mayor tamaño es de 60mm en base al espacio disponible en la estructura.

A. Rueda conducida

$$D_e = 60mm$$

Se parte desde

$$Z_c = 28$$

Cálculo del modulo

$$D_e = m(Z_c + 2) \quad (3.26)$$

$$m = 2$$

Cálculo de los diámetro primitivo e interior

$$D_p = Z_c \times m \quad (3.27)$$

$$D_p = 56$$

$$D_i = D_p - 2.5 \times m$$

$$D_i = 51$$

Para el cálculo del alto del diente se tiene:

$$h = 2.25 \times m \quad (3.28)$$

$$h = 4.5$$

Ancho de cara

$$X = \frac{3 \times Y}{2 \times P}$$

Factor de forma de Lewis Ver anexo B

$$Y = 0.353$$

$$P = \frac{1}{m} \quad (3.29)$$

$$X = \frac{3 \times Y \times m}{2} \quad (3.30)$$

$$X = 1.06$$

$$X = \frac{t^2}{4 \times h}$$

$$t = 4.36$$

B. Ruedas conductoras

Para el cálculo del número de dientes se establece el mínimo número para que no exista interferencia.

$$N_p = \frac{2k}{(1 + 2m) * \sin^2(\phi)} * (m + \sqrt{m^2 + (1 + 2m) * \sin^2(\phi)}) \quad (3.31)$$

Ya que el diente tiene una profundidad completa y ángulo de presión

$$K = 1$$

$$\phi = 20^\circ$$

$$N_p = 14.12 \approx 15 = Z_p$$

Por lo tanto, se obtiene una relación de reducción

$$i = \frac{Z_p}{Z_c} = 0.53$$

Para el cálculo de los dientes primitivos, interior y exterior mediante la ecuación (3.27) e obtuvo.

$$D_p = 30$$

$$D_e = 34$$

Para el cálculo del alto del diente se mediante la ecuación (3.28) se obtuvo.

$$h = 4.5$$

Obteniendo el ancho de cara y la forma de Lewis

$$Y = 0.290 \quad X = 0.87 \quad t = 3.96$$

C. Velocidad en cada etapa

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{z_1}{z_2}$$

$$w_2 = 0.78 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

D. Torque en cada etapa

Con los datos del motor a pasos seleccionado se obtiene el valor de la potencia.

$$P = 4.47 W$$

E. Rueda conductora

$$T = \frac{P}{W} \quad (3.32)$$

$$T = 3.04 Nm$$

F. Rueda conducida

En este caso se considera un sistema igual donde la potencia de salida es igual a la potencia de entrada.

$$T = \frac{p}{w}$$

$$t = 5.73 Nm$$

En la *Figura 41* se puede observar el diseño del sistema de engranajes.



Figura 41. Diseños finales de los engranajes

3.4.5. Selección de la pantalla

La pantalla es uno de los elementos más importante del robot debido a que muestra la interfaz de usuario, la cual permite realizar el proceso de videollamada, en la Tabla 23 se detallan las especificaciones de dicha pantalla.

Tabla 23
Especificaciones de la pantalla.


| Modelo | Imagen | Características |
|--------------------|---|---|
| Lilliput669GL-70NP |  | <ul style="list-style-type: none"> • Pantalla de 7" Táctil • Alimentación de 12VDC • Resolución de 1,920 x 1,080 pixeles • Consumo < 8 W • Parlantes incorporados |

La pantalla seleccionada tiene características que se ajustan a los requerimientos del robot, como su voltaje de alimentación, alta resolución en pantalla, parlantes incorporados y bajo consumo de energía

3.4.6. Selección de la cámara web

La cámara utilizada para el proceso de videollamada y el sistema de reconocimiento de rostros es una Logitech C930e, a continuación, se muestran las características en la Tabla 24.

Tabla 24
Especificaciones de la cámara web

| Modelo | Imagen | Características |
|----------------|---|---|
| Logitech C930e |  | <ul style="list-style-type: none"> • HD 1080p video y 30 frames-por-segundo • 1080 pixeles • 90 grados de campo visual • Zoom 4x en 1080p • Plug-and-play USB connectivity |

3.4.7. Estructura de la base del sistema giratorio

La base del sistema giratorio sujeta dos soportes que contienen a la cámara y a la pantalla respectivamente. En el interior de la base se encuentran dos actuadores, que ayudan con la rotación del sistema. Se realizó un análisis estático al elemento diseñado obteniendo un desplazamiento

unitario máximo de 2.4×10^{-3} (mm) y un esfuerzo máximo de 9.1×10^{-4} (N/m²), como se puede observar en la Figura 42.

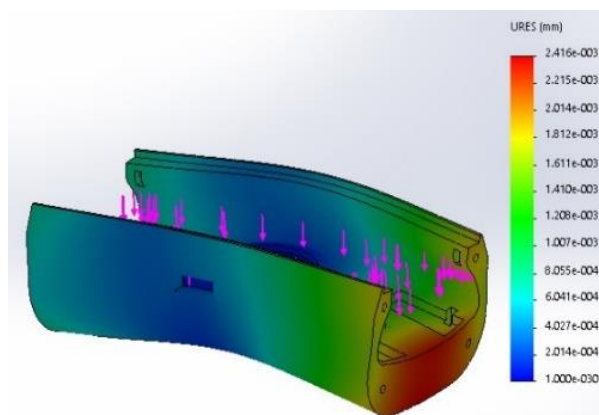


Figura 42. Análisis estático del sistema de movimiento giratorio

A. Análisis CAE del subsistema 2

Se realizó el análisis estático para los elementos descritos en la Tabla 25, de manera que se pueda conocer su comportamiento al aplicar una fuerza.

Tabla 25

Análisis estático para las piezas del subsistema 1

| | |
|---|--|
|  | <p>Base del sistema giratorio</p> <p>Esfuerzo Von Mises: 9.188×10^4 (N/m²)</p> <p>Deformación Unitaria: 2.214×10^{-5}</p> <p>Desplazamiento Estático: 2.416×10^{-3} (mm)</p> |
|  | <p>Soporte de Pantalla Lateral Derecho</p> <p>Esfuerzo Von Mises: 1.536×10^5 (N/m²)</p> <p>Deformación Unitaria: 4.010×10^{-5}</p> <p>Desplazamiento Estático: 6.22×10^{-3} (mm)</p> |

Continúa →



Soporte de Pantalla Lateral Izquierdo

Esfuerzo Von Mises: $1.385 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 4.079×10^{-5} Desplazamiento Estático: $2.643 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$

3.4.8. Diseño electrónico de la placa de control para los actuadores

La placa de control del subsistema 2 se encarga de recibir información del computador para su posterior accionamiento a los diferentes actuadores del subsistema.

Para realizar el cálculo del ancho de pista se requieren los siguientes datos:

- Corriente máxima: 2A
- Variación máxima de temperatura: 15°C
- Altura: 35 micras

Aplicando la ecuación (3.31) con los datos anteriores se obtiene un ancho de pista de 21 mils para la placa de control del sistema de dos grados de libertad.

En la Figura 43, se observa tanto el diagrama esquemático como el diseño final de la placa electrónica.

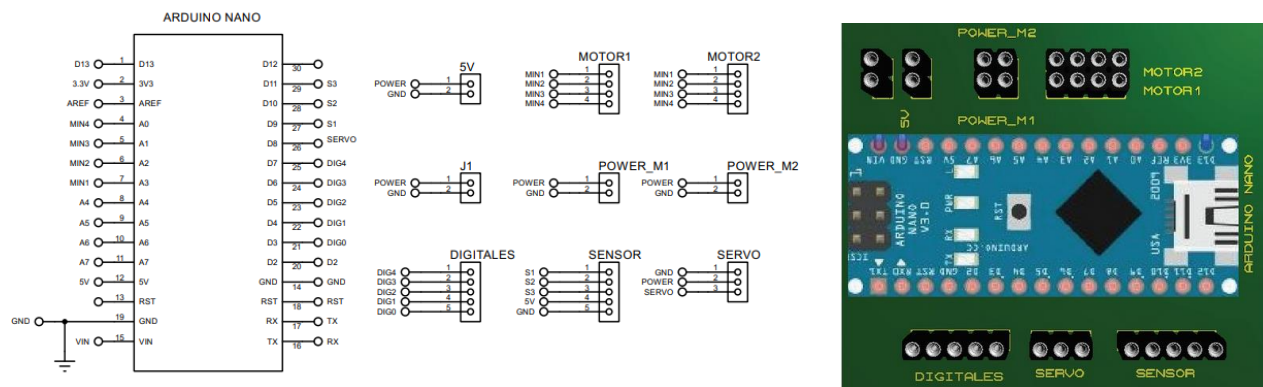


Figura 43. Circuito electrónico del sistema de 2 grados de libertad

3.4.9. Diseño electrónico de la tarjeta para la iluminación RGB

En esta placa se recibe una señal para activar las secuencias en los anillos RGB las cuales están ubicadas en los soportes laterales del robot. Para realizar el cálculo del ancho de pista se requieren los siguientes datos:

- Corriente máxima: 1A
- Diferencia de altura con el ambiente: 15 °C
- Altura: 35 micras

Aplicando la ecuación (3.24) con los datos anteriores se obtiene un ancho de pista de 8 mils. En la Figura 44, se observa tanto el diagrama esquemático como el diseño final de la placa electrónica.

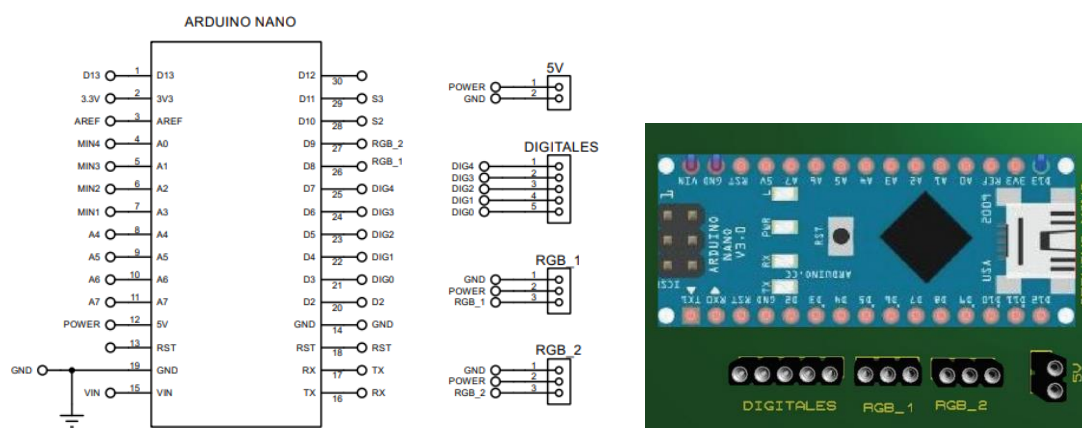


Figura 44. Esquema del circuito para la placa del sistema de las cintas RGB

3.4.10. Análisis de Volcamiento

El análisis de volcamiento permite encontrar un estimado del peso que debe tener el robot, en la Figura 45 se pueden observar las fuerzas del sistema.

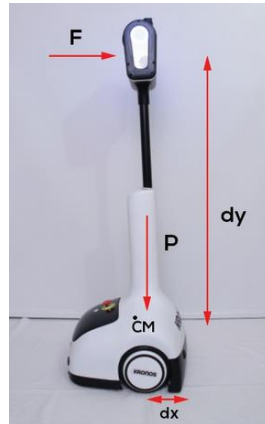


Figura 45. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el robot

$$F = 5 \text{ kg}$$

$$dy = 1400 \text{ mm}$$

$$dx = 345 \text{ mm}$$

Tomando en cuenta que F es la fuerza que puede ocasionar el volcamiento del robot, dy es la distancia vertical desde el centro de gravedad del robot hasta el punto donde es aplicada la fuerza y dx es la distancia horizontal de la línea de acción, se puede estimar un factor de seguridad de 1.3.

- El primer paso es aplicar la fórmula para encontrar el momento volcador y el momento estabilizador.

$$M_v = F_{(g)} \times dy \quad (3.33)$$

$$M_e = P_{(g)} \times dx \quad (3.34)$$

- Para calcular el factor de seguridad, se realiza una relación entre los momentos.

$$\frac{M_v}{M_e} \geq fs \quad (3.35)$$

Se despeja la variable P de la fórmula (3.34), y luego de sustituir los valores encontramos el valor del peso total que debería tener el robot.

$$P = 26 \text{ kg}$$

El diseño del robot de telepresencia tiene un peso total de 32.5 kg, obteniendo un factor de seguridad de 1.63, al ser mayor que el valor propuesto se logra evitar el volcamiento del robot.

3.4.11. Funcionamiento del subsistema 2

El sistema cuenta con un microcontrolador que recibe la información del computador para el control del sistema de dos grados de libertad y para la activación la iluminación RGB que se encuentran en los soportes laterales del robot. El funcionamiento se explica en el diagrama de la Figura 46.

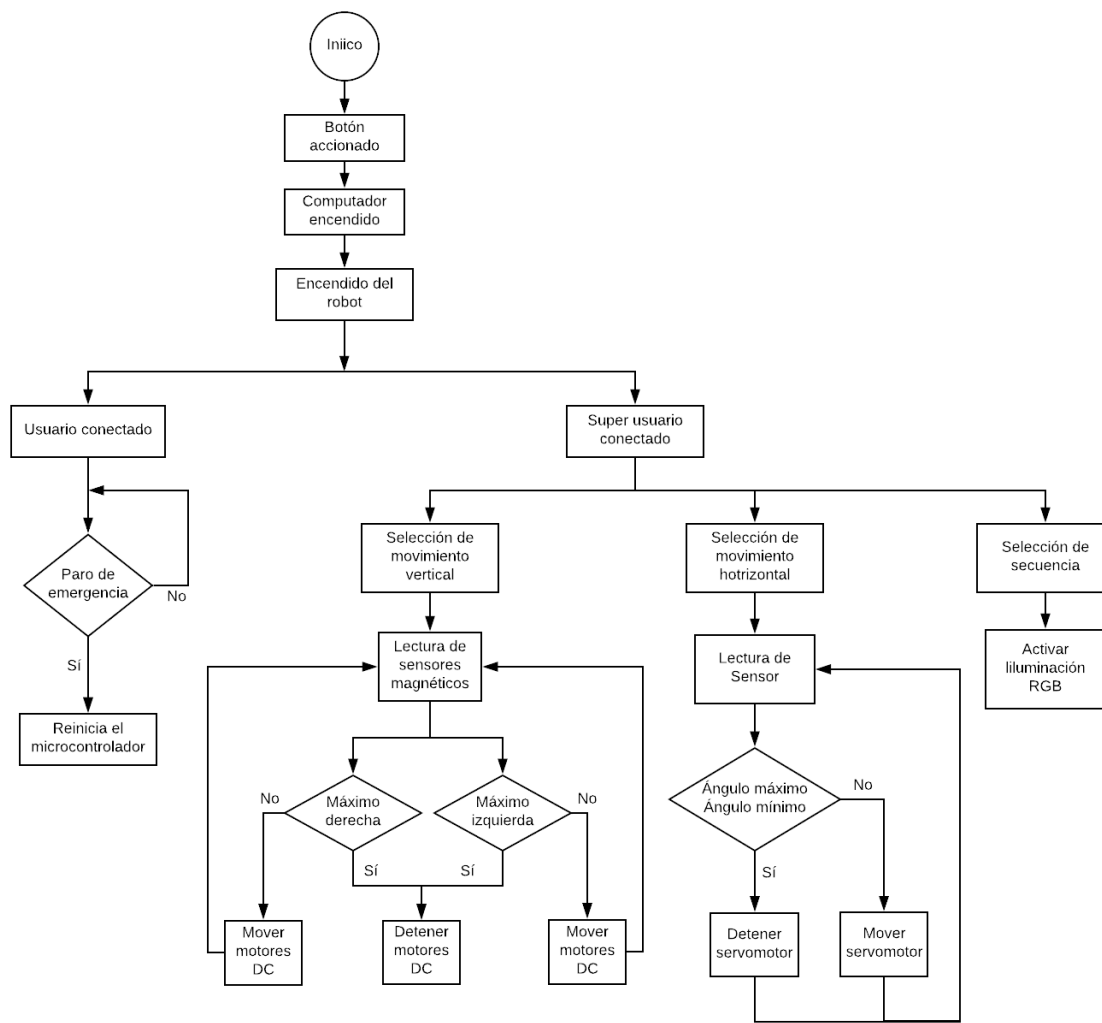


Figura 46. Funcionamiento del subsistema 2

3.5. Subsistema 3. Suministro de energía

3.5.1. Alimentación del robot

Es necesario contar con un suministro de energía para los actuadores, sensores y controladores que conforman el robot de telepresencia. Cada uno tiene su respectivo consumo de energía, cuyo análisis se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26

Consumo energético del robot

| Elemento | Potencia (W) |
|-------------------------|---------------------|
| Pantalla 7" 12V | 7.20 |
| Webcam 5V | 0.05 |
| Iluminación RGB 5V | 2.76 |
| Sensores Infrarrojos 5V | 0.67 |
| Motores a paso 5V | 0.28 |
| Motores 12v | 36.00 |
| Actuador Lineal 12V | 14.40 |
| Raspberry Pi 3 B+ 5V | 4.00 |
| Microcontrolador 5V | 0.08 |
| Ventilador 5V | 0.70 |
| Drivers Motores 12V | 6.50 |
| Parlante 5V | 10.00 |
| TOTAL | 72.63 |

En la tabla se puede observar un consumo máximo de 72.63W y un voltaje que no supera los 12V, para conocer el amperaje requerido por los componentes se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{Corriente eléctrica} = \frac{P}{V} \quad (3.43)$$

$$\text{Corriente eléctrica} = 6.05 \text{ A}$$

El requerimiento de autonomía para el funcionamiento del robot es un mínimo de 2 horas:

$$\text{Carga eléctrica mínima} = 6.05 \text{ (A)} \times 2h$$

$$\text{Carga eléctrica mínima} = 12.1 \text{ Ah}$$


3.5.2. Selección del tipo de batería

Tomando en cuenta el cálculo realizado anteriormente, se presenta en la Tabla 27 tres posibles soluciones para el suministro de energía del robot.

Tabla 27

Especificaciones de las soluciones para la elección de la batería

| | Solución A | Solución B | Solución C |
|------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Marca | FAMA | POWERIZER LIFEPO4 | NANO - TECH |
| Voltaje (V) | 12 | 12 | 11.1 |
| Capacidad (A/h) | 18 | 20 | 8.4 |
| Peso (Kg) | 5.8 | 3 | 0.62 |
| Costo (\$) | 75 | 490 | 230 |



En base los resultados obtenidos, se selecciona la batería FAMA de 12V y 18 A/h, por sus características de capacidad, los resultados de la selección se pueden observar en la Tabla 28.

Tabla 28

Conclusión de la selección del tipo de batería

| Criterio | Voltaje de salida | Capacidad | Peso | Costo | Σ | Prioridad |
|-------------------|--------------------------|------------------|-------------|--------------|----------|------------------|
| Solución A | 0.068 | 0.088 | 0.017 | 0.275 | 0.449 | 1 |
| Solución B | 0.068 | 0.162 | 0.060 | 0.025 | 0.315 | 2 |
| Solución C | 0.008 | 0.015 | 0.188 | 0.025 | 0.236 | 3 |
| | | | | Total | 1.000 | |

Una vez seleccionada la batería FAMA de 12v 18Ah, es necesario realizar un nuevo cálculo de la autonomía real del sistema.

$$\text{Autonomía del robot} = \frac{18 \text{ Ah}}{6.05 \text{ A}}$$

$$\text{Autonomía del robot} = 3.37 \text{ horas}$$

3.6. Subsistema 4. Comunicación

El subsistema de comunicación está encargado del envío de información por medio de internet. Se lo realiza de manera inalámbrica en una red de área amplia, entre el sistema local (robot), y el sistema remoto (superusuario).

3.6.1. WAN

El robot de telepresencia puede ser controlado a largas distancias gracias a la arquitectura WAN que elimina la conexión alámbrica, permitiendo mantener la fidelidad en el envío de información, siendo en este caso, audio, video y datos de control para el robot.

A continuación, se describe las ventajas y desventajas de la implementación de la red WAN.

A. Ventajas

- Se elimina la conexión por cables
- Mayor distancia de cobertura (depende del servicio)
- Fácil implementación
- No existe limitaciones geográficas

B. Desventajas

- Se requiere un equipo con velocidad de procesamiento y buena conexión
- No tiene buena seguridad en el intercambio de comunicación
- Tiene vulnerabilidad a intrusiones en la red.
- Nivel de transferencia de datos menor que una red LAN

3.6.2. Topología de red

La topología de red explica cómo se realiza el intercambio de datos y la conexión del sistema, en la Figura 47 se observa los nodos de comunicación.



Figura 47. Topología de red del robot de telepresencia

3.6.3. Videollamada y comandos de control a través de fbchat

El sistema de comunicación para la video llamada y control del robot de telepresencia, se desarrolló en el lenguaje de programación Python, haciendo uso de una librería para mensajería instantánea. La misma que sido desarrollado en Python (Kim, 2015) , hace uso de un correo electrónico y una contraseña guardada en un archivo con acceso restringido, para comunicarse con el servidor.

Al momento de iniciar sesión se crea una instancia de tipo Client. Los servicios que se obtiene con esta librería cuentan con una variedad de funciones, entre ellas está la capacidad de obtener información básica como nombres de los usuarios, responder a mensajes, leer mensajes recibidos, adquirir el ID del usuario, etc.

Se eligió la plataforma de mensajería instantánea debido a que por este medio los usuarios pueden mantener contacto entre sí, además de permitir el envío bidireccional de información, realizar llamadas tanto de video como de voz y poder compartir la ubicación a través de la geolocalización por IP, entre otros elementos que son indispensables para el robot de telepresencia.

3.7. Subsistema 5. Sistema de visión artificial

3.7.1. Método de programación

A. Programación por hilos

El método de hilos más conocido por su traducción al inglés como “thread”, es un método muy dinámico que dispone de varias subrutinas llamadas hilos las cuales pueden ser ejecutadas al mismo tiempo (Carbajal, 2013).

Este método permite ahorrar recursos en memoria, ayudar al diseño del programa para que sea más sencillo y comprensible. El presente trabajo dispone de 3 hilos de programación, a continuación, se presentan las funciones que desempeñan.

- Hilo 1
 - Chatbot
 - Recepción de datos (super usuario)
 - Comunicación con el microcontrolador
- Hilo 2
 - Videollamada
 - Reconocimiento facial
 - HMI
 - Generación de usuarios
- Hilo 3
 - Envío de datos de geolocalización por IP
 - Envío del ID del usuario

El primer hilo es el encargado de recibir los datos enviados por el superusuario para la movilización del robot. El segundo hilo habilita la cámara web para realizar el proceso de reconocimiento de rostros y posteriormente iniciar la videollamada, además realiza la generación de nuevos usuarios con el manejo de una base de datos. Finalmente, el tercer hilo se encarga de enviar los datos tanto de latitud como longitud usando la geolocalización de Google API para posteriormente enviarla al superusuario.

3.7.2. Algoritmo del sistema de reconocimiento de rostros

El sistema usa el método de reconocimiento de rostros, con la finalidad de identificar a los usuarios que deseen interactuar con el robot. La programación fue realizada en lenguaje Python con la ayuda de la librería OPENCV, utilizando la versión 16.4 de Ubuntu y la versión 2.7.12 de Python. Se utiliza además el algoritmo de Viola Jones usando la técnica de patrones binarios locales “LBP”, para reconocer e identificar rostros.

Al iniciarse la cámara se captura una imagen, la misma es sometida a una escala de reducción deformando la cuadrícula de la foto, pero manteniendo los parámetros básicos de la misma y se asigna a la imagen final, esto se hace con el fin de facilitar el proceso de reconocimiento, para lo cual se aplica la función RESIZE de opencv que se muestra a continuación.

$$dst(x, y) = src(f_x(x, y), f_y(x, y))$$

Para cada pixel (x,y) de la imagen destino, la función calcula las coordenada de la imagen de entrada. El siguiente paso es transformar a escala de grises la imagen, para aplicar el algoritmo de Viola Jones, con el método de patrones binarios locales, aquí se representa cada pixel de la imagen

tomada en una matriz, la misma es sometida a una comparación de los valores que rodean al punto central y si el número es mayor corresponde el valor de 1, de lo contrario el valor es 0.

El operador LBP se lo puede definir cómo:

$$LBP(x_c, y_c) = \sum_{p=0}^{p-1} 2^p s(i_p - i_c)$$

Donde:

- (x_c, y_c) es el pixel central de identidad
- i_c ; y i_n es la intensidad del pixel que lo rodea
- s es la función del signo

La función de signo se define como:

$$s(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Al tener las matrices binarias se realiza una codificación, la misma nos permite conocer si la imagen de entrada coincide con una de las imágenes de destino, de esta manera retorna la identidad del usuario, y en caso de no existir registro en la base de datos devuelve un mensaje “usuario desconocido”.

Después realiza la videollamada. En la Figura 48 se encuentra el diagrama de flujo del sistema de reconocimiento que se encuentra en el robot.

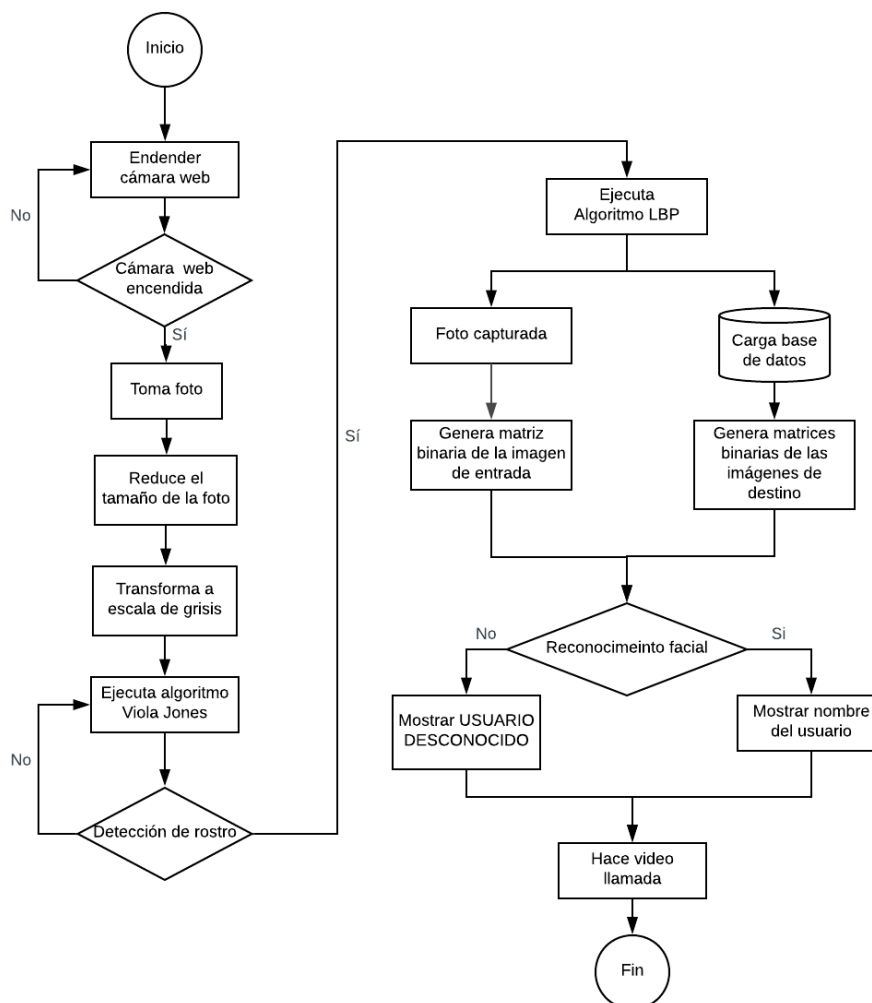


Figura 48. Diagrama de flujo del proceso de reconocimiento de rostros

3.8. Subsistema 6. Interfaz humano máquina (HMI)

La interfaz es el medio por el cual el usuario puede controlar e interactuar con el robot, en este sistema se cuenta con dos interfaces gráficas. La primera es para el super usuario que permite controlar el robot y realizar la video llamada y la segunda está ubicada en el robot permitiendo a los usuarios realizar la solicitud de videollamada.

3.8.1. Distribución de la HMI

El robot de telepresencia al ser un robot social debe tener una interfaz de usuario amigable e intuitiva. Citando a la guía GEDIS, se realiza la distribución de los elementos en la pantalla para que el usuario tenga una mejor interacción la cual se puede observar en la Figura 49.

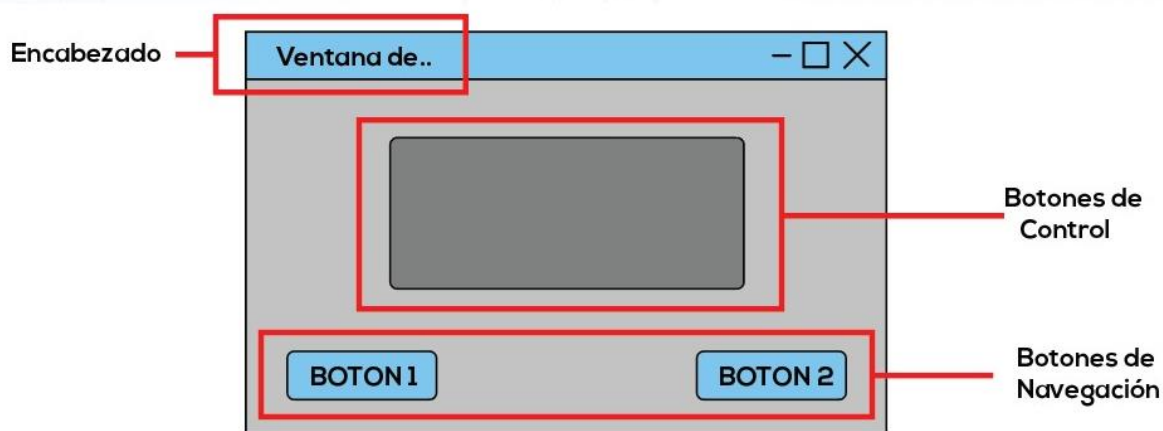




Figura 49. Distribución de la HMI

3.8.2. HMI del superusuario

A. Arquitectura de la HMI del superusuario

La arquitectura describe en qué orden son mostradas las ventanas y su funcionamiento, en la Tabla 29 se puede observar la arquitectura de la HMI del superusuario.

Tabla 29*Arquitectura de la HMI del sistema*

| HMI | Funcionamiento |
|--|--|
|  | <p>Pantalla de ingreso del usuario</p> <p>La ventana inicial se encarga de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingresar el nombre de usuario y contraseña para permitir el acceso. • Al validarse esta información el usuario logrará tener acceso al control del robot. |
|  | <p>Ventana de control del robot</p> <p>En la ventana de control del robot permite realizar las siguientes tareas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar la videollamada. • Controlar el desplazamiento del robot. • Controlar el movimiento de la cámara. • Controlar la altura del robot. • Recibir la ubicación del robot por medio del sistema de geolocalización por IP. |

B. Funcionamiento de la HMI del superusuario

En la primera ventana se realiza una validación de usuario en la cual únicamente el superusuario puede ingresar con su clave. A continuación, se despliega una ventana que permite controlar, tanto el movimiento, la regulación de altura y el movimiento de la cámara del robot. Además, permite obtener la ubicación usando la geolocalización, en el diagrama de la Figura 50 se explica el funcionamiento de la HMI para el superusuario.

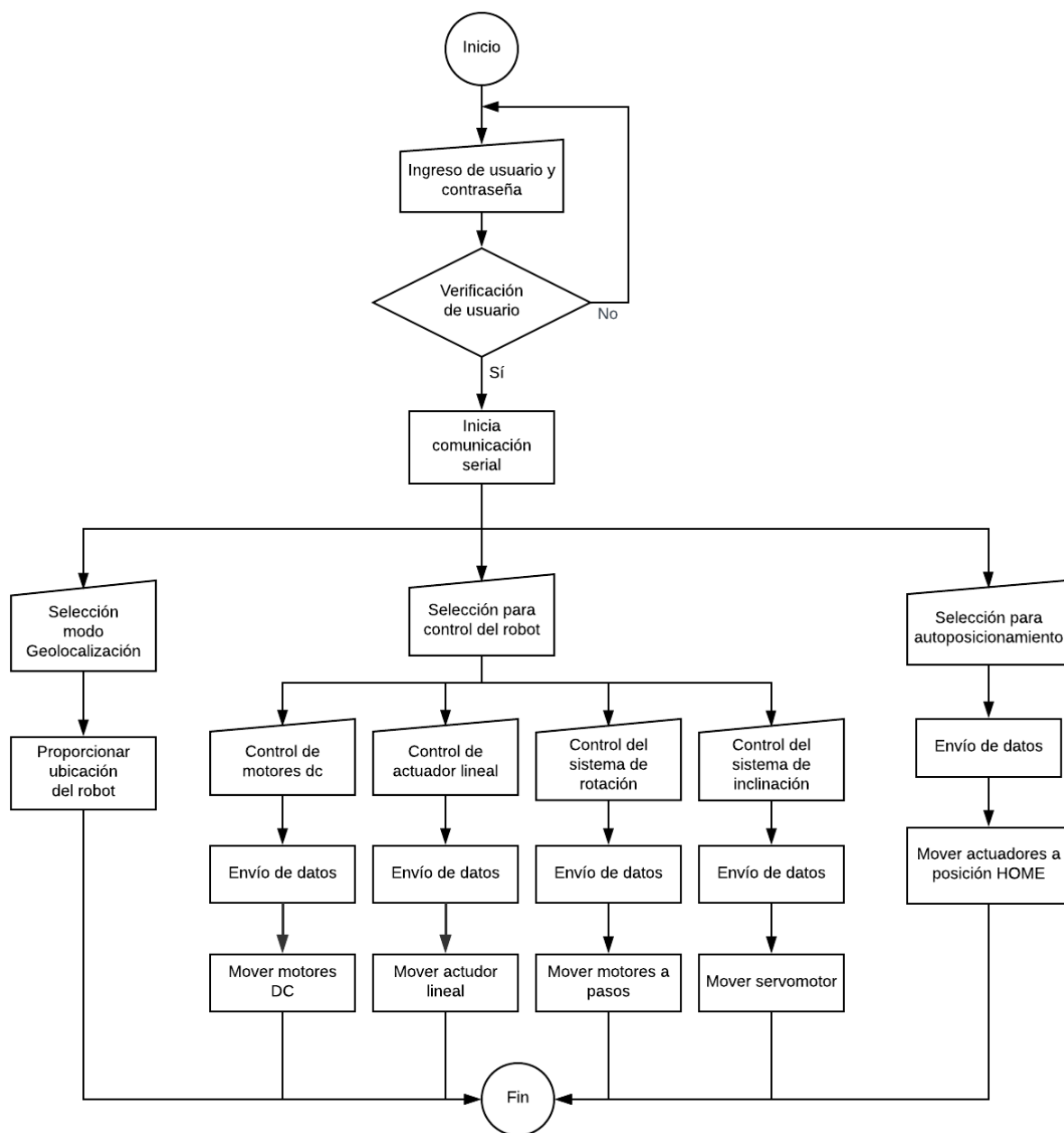





Figura 50. Diagrama de funcionamiento de la HMI del super usuario

3.8.3. HMI del robot

A. Arquitectura de la HMI del robot

El robot cuenta con una interfaz gráfica que le permite interactuar con el usuario para realizar tareas tales como la videollamada y establecer una comunicación con el súper usuario, en la Tabla 30 se muestra la arquitectura del sistema.

Tabla 30
Arquitectura de la HMI de robot

| HMI | FUNCIONAMIENTO |
|---|---|
|  | <p>Ventana de inicio</p> <p>La ventana inicial se encarga de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingresar nombre de usuario y contraseña para acceder al sistema. • Al validarse la información se tiene acceso al robot de telepresencia. |
|  | <p>Ventana de menú</p> <p>En la ventana de menú nos permite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar el modo identificar • Seleccionar el modo configurar |
|  | <p>Ventana de configuración</p> <p>En la ventana de configuración podemos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ingresar al modo generar • Ingresar al modo buscar |

B. Funcionamiento de la HMI

A continuación, en el diagrama de la Figura 51 se detalla el funcionamiento de la HMI del usuario.

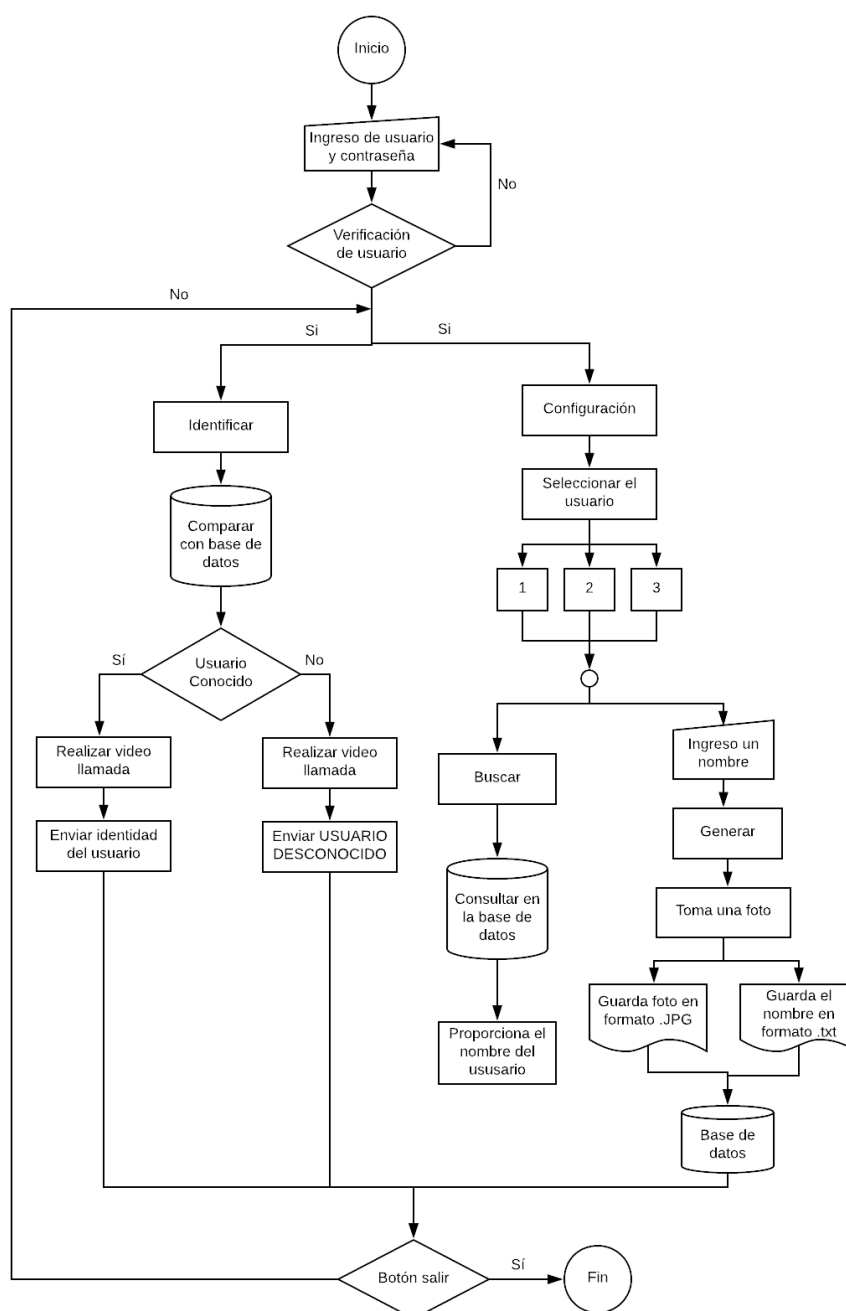


Figura 51. Diagrama de flujo de la HMI del robot

3.9. Concepto final

Una vez realizado los cálculos respectivos para justificar el diseño del robot, en la Figura 52 se puede observar el diseño final. El cual dispone de una plataforma móvil basada en un sistema diferencial, sobre la misma descansa el sistema que permite regular la altura y orientación tanto de la cámara web como de la pantalla.



Figura 52. Concepto final

3.10. Resumen

En el presente capítulo se detallan los métodos utilizados para el diseño del robot, partiendo de las necesidades del usuario se establecen los principales parámetros a ser analizados. Entre ellos se encuentran la facilidad en su mantenimiento, la robustez del robot, un sistema de operación intuitivo, la estética, entre otros.

El sistema está compuesto de diferentes conceptos de ingeniería, tanto mecánicos, electrónicos, como de software. El sistema general se divide en 6 subsistemas que faciliten su diseño y

construcción siendo estos la base del robot, el sistema de movimiento giratorio de la pantalla y la cámara, el suministro de energía, el sistema de comunicación, el sistema de visión artificial, y HMI.

Para el primer subsistema se realizan los cálculos necesarios para determinar los esfuerzos que va a soportar la base principal y de esta manera elegir el material y la geometría adecuados. Así mismo, se realizan los análisis necesarios usando un software CAD para el diseño de las piezas que serán usadas como soportes de los motores y del sistema de altura regulable. Posteriormente se selecciona los controladores tanto para los motores de como para el actuador lineal, y finalmente se realiza el diseño de la placa de control principal.

El segundo subsistema consiste en el diseño de un mecanismo de dos grados de libertad para el movimiento del sistema giratorio para la cámara y la pantalla. Para ello se desarrolló una justificación tanto de los elementos mecánicos como electrónicos utilizados para mover el sistema.

En el tercer subsistema se dimensiona el suministro de energía que abastecerá a los diferentes actuadores como sensores que componen el robot para obtener una autonomía de 3 horas.

El cuarto subsistema es la comunicación, donde se puede analizar que método se utiliza para controlar al robot mediante internet al igual que la topología de red.

El penúltimo subsistema es la visión artificial, donde se detalla el lenguaje de programación y el algoritmo utilizado para el sistema de reconocimiento de usuarios a través de rasgos faciales.

El subsistema final es la HMI, donde se detalla la arquitectura y funcionamiento de las ventanas, citando la guía GEDIS, que facilita el diseño y distribución de los elementos en la interfaz gráfica. Además, proporciona al usuario la información necesaria para poder controlar el robot de manera intuitiva.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

El capítulo describe el proceso de implementación de cada subsistema que conforma el robot de telepresencia, con sus componentes mecánicos y electrónicos. Además de presentar las respectivas pruebas y resultados obtenidos del proyecto.

4.1. Implementación

4.1.1. Estructura de la base del robot

El primer paso es la construcción de la estructura metálica de la base del robot de telepresencia, la cual soporta todo el peso del robot. Considerando los cálculos realizados anteriormente se utiliza perfiles cuadrados de acero A36, en la Tabla 31 se puede observar las características del mismo.



Tabla 31

Parámetros de la estructura

| Parámetro | Especificación |
|------------------|-----------------------|
| Material | Acero A36 |
| Sección | Cuadrada de 20 mm |
| Espesor de pared | 2mm |

A continuación, en la Tabla 32 se muestra la hoja de procesos, la misma que detalla las dimensiones de la estructura, los materiales, máquinas y herramientas utilizadas, además se describe las operaciones realizadas y el tiempo del desarrollo de cada proceso.

Tabla 32*Hoja de procesos para la estructura de la base*

| HOJA DE PROCESOS – ESTRUCTURA METÁLICA | | | | |
|--|--|---|---|--------------------------------|
| Dimensiones 500x500 [mm] | | | | |
| Encargados | | Freddy Córdova L. Santiago Medina T. | | |
| Elemento | Recursos Materiales | Operaciones | Herramientas & Maquinaria | Tiempo asignado |
| Estructura Metálica Principal  | Tubería Estructural cuadrada 20x20x2 mm Acero ASTM A36 | Trazar medidas Cortar Doblar | Regla metálica Rayador Sierra de Arco Dobladora de Tubo | 45 min 45 min 60 min |
| | Electrodos | Soldar | Soldadura SMAW | 45 min |
| | Brocas | Perforar orificios | Taladro de mano | 20 min |
| | Pintura esmalte | Lijar Pulir Pintar | Lijas Moladora Soplete | 45 min |
| | Sujetador de Batería  | Ángulo 20x2 mm Acero ASTM A36 | Trazar medidas | Regla metálica Rayador |
| Electrodos | Cortar Soldar | Sierra de Arco Soldadura SMAW | 10 min 25 min | |
| Brocas | Perforar orificios | Taladro de mano | 20 min | |
| Pintura | Lijar Pulir Pintar | Lijas Moladora Soplete | 20 min | |

4.1.2. Estructura del soporte para el actuador lineal

Para la implementación del soporte del actuador lineal se utiliza la tecnología de impresión 3D, con la máquina Tronxy x5s. El porcentaje de relleno utilizado para la fabricación es del 40% con material PLA de 1.75mm de espesor. En la Figura 53 se puede observar los parámetros de impresión 3D. El actuador lineal instalado en el soporte una vez impreso como se puede observar en la Figura 54.

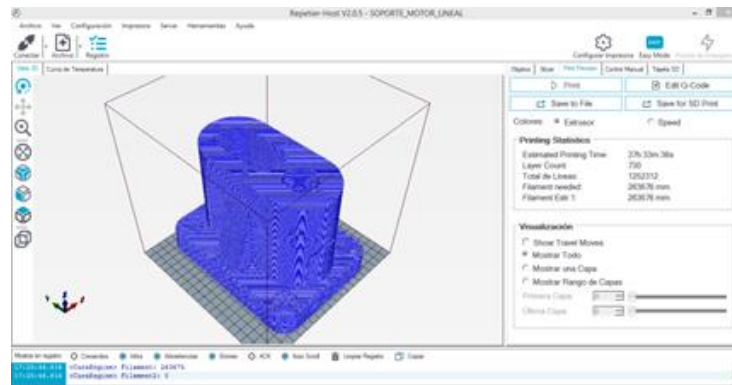


Figura 53. Parámetros de impresión 3d en el programa RepetierHost



Figura 54. Actuador lineal instalado al soporte

4.1.3. *Instalación de los componentes a la base del robot*

Una vez construida la estructura metálica, se procede a la instalación de los motores con sus respectivos soportes impresos en 3D, como se muestra en la Figura 55. Además, se sujeta el soporte para el actuador lineal utilizando pernos hexagonales de 5/16”.

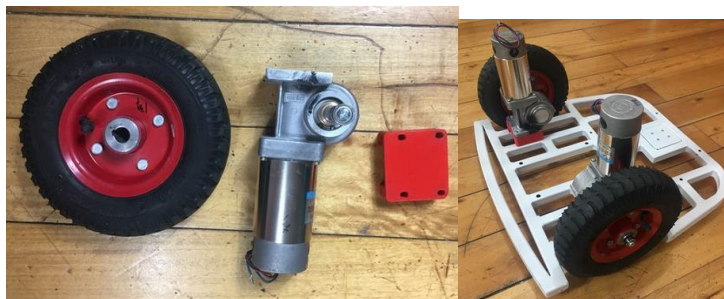


Figura 55. Instalación de los actuadores a la base del robot

4.1.4. *Estructura para el movimiento de la pantalla y la cámara web*

El primer grado de libertad de la estructura está situado en el eje z como se muestra en la *Figura 56*, su implementación empieza con la impresión 3D de la base principal, con un 40% de relleno. En la *Figura 57* se ilustra su proceso de impresión en la máquina Prusa i4.

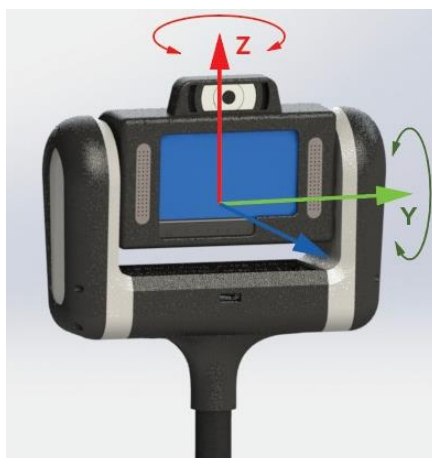


Figura 56. Sistema de dos grados de libertad

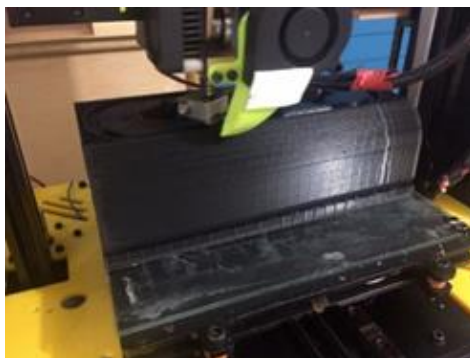


Figura 57. Impresión 3D de la base del subsistema 2

El siguiente paso consiste en instalar el engranaje conducido con un rodamiento al perfil circular. Aquí se apoyará el sistema de movimiento giratorio, reduciendo así su fricción al momento de accionar los motores a paso, con sus respectivos engranajes conductores previamente instalados como se muestra en la *Figura 58*. Las características del perfil circular se observan en la Tabla 33.



Figura 58. Instalación de los motores a paso y engranajes

Tabla 33

Parámetros del perfil circular

| Parámetro | Especificación |
|------------------|-----------------------|
| Tipo se sección | Circular |
| Material | Aluminio |
| Espesor | 2 mm |

4.1.5. Instalación de los soportes para la cámara y pantalla

Una vez impreso en 3D los soportes laterales para la cámara y pantalla son sujetados a la base principal, seguido a esto se coloca un rodamiento a uno de ellos como se muestra en la Figura 59



Figura 59. Instalación de los soportes laterales

Para el segundo grado de libertad se instala un servomotor junto al rodamiento que fue previamente instalado en el soporte lateral derecho, facilitando el movimiento de arriba hacia abajo de la pantalla y cámara, como se muestra en la Figura 60.



Figura 60. Instalación de la cámara web y la pantalla

Finalmente se instala la pantalla y la cámara web con sus respectivos soportes, como se puede observar en la Figura 61.



Figura 61. Instalación de la pantalla y la cámara web

En la Figura 62 se puede observar el resultado de los dos subsistemas ya enlazados, listos para la implementación de la etapa electrónica.



Figura 62. Ensamble de subsistemas

4.1.6. Elaboración de las placas electrónicas de control

De acuerdo a los requerimientos de cada subsistema se diseñaron y fabricaron 2 placas de control. El diseño de la primera placa electrónica se muestra en la Figura 63, cuenta con etiquetas para facilitar su conexión y mantenimiento cuya distribución se muestra en la Tabla 34.

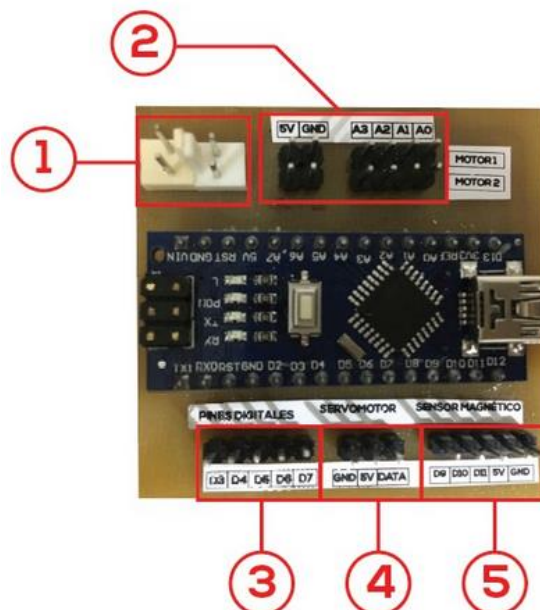


Figura 63. Etiquetado de la placa del subsistema 2

Tabla 34

Descripción de las etiquetas de la placa del subsistema 2D

| Etiqueta | Descripción |
|-----------------|-------------------------------------|
| 1 | Alimentación externa |
| 2 | Motores a paso |
| 3 | Señales para sistema de iluminación |
| 4 | Servomotor |
| 5 | Señales de sensores magnéticos |

La segunda placa y su distribución se muestra en la Figura 64, dicha placa recibe las órdenes del computador por USB con el fin de accionar a los actuadores que darán movilidad al robot. Así mismo la descripción de las etiquetas se muestran en la Tabla 35.

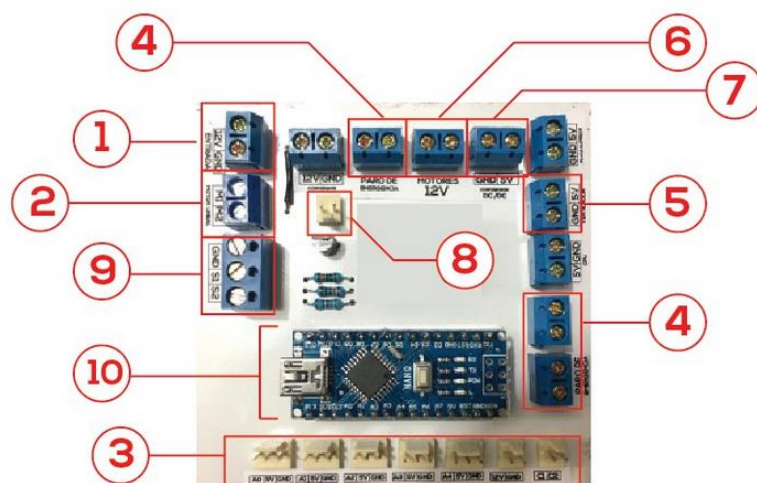


Figura 64. Etiquetado de la placa del subsistema 1

Tabla 35

Descripción de las etiquetas de la placa del subsistema 1

| Etiqueta | Descripción |
|-----------------|----------------------------|
| 1 | Alimentación de la batería |
| 2 | Actuador lineal |
| 3 | Sensores infrarrojos |
| 4 | Paro de emergencia |
| 5 | Ventilador 5V |
| 6 | Motores 12v |
| 7 | Convertor dc-dc |
| 8 | Parlante |
| 9 | Control Motores 12 V |
| 10 | Microcontrolador |

4.1.7. Instalación de placas electrónicas

El siguiente paso consiste en conectar los módulos, sensores y actuadores que pertenecen al subsistema 2 (placa de la base del sistema giratorio). Se utilizó funda espiral de polietileno, como se puede ver en la Figura 65 ya que este componente ayuda con la organización de los cables evitando que sufran daños.



Figura 65. Instalación de placas electrónicas

La placa de control para el sistema de iluminación se conecta al soporte lateral derecho, como lo indica la *Figura 66*.



Figura 66. Instalación de la placa electrónica para la iluminación RGB

Finalmente se realiza las conexiones en la placa principal de los actuadores, sensores y componentes electrónicos correspondientes al subsistema 1 cuyo proceso de instalación se ilustra en la *Figura 67*.

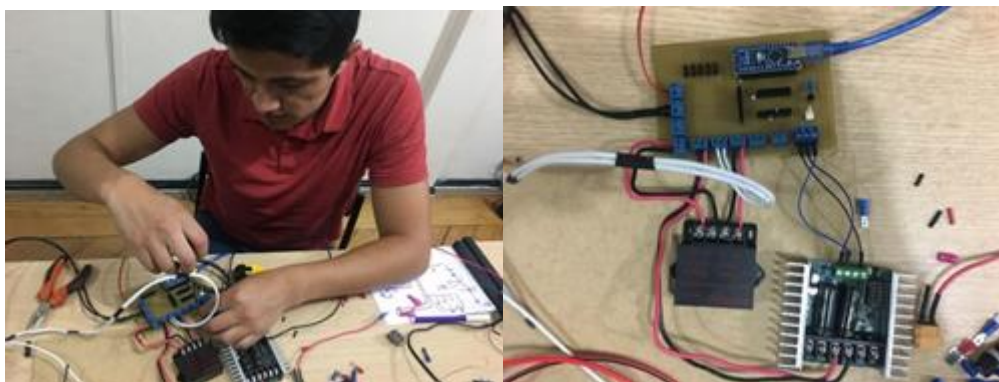


Figura 67. Instalación de actuadores de la placa principal

4.1.8. *Fabricación e instalación del chasis del robot*

El requerimiento de la matriz de calidad menciona que la estructura del robot dese ser robusta y de fácil mantenimiento, por ello se encogió la fibra de vidrio como material principal del chasis por sus características que se muestran a continuación:

- Alta resistencia a la tracción
- Bajo costo de mantenimiento
- Peso reducido
- Aislamiento eléctrico
- Fácil manipulación
- Resistencia a la corrosión y erosión química

Para la fabricación del chasis de fibra de vidrio se empieza con la elaboración del molde de yeso, como se puede ver en la Figura 68(a). Sobre este molde se aplican varias capas de resina de poliéster con fibra de vidrio, cubriendo por completo el molde de yeso, como lo indica la Figura 68(b). A continuación, se corrigen las imperfecciones con masilla plástica para un posterior proceso de lijado, dejando la superficie lisa como lo indica la Figura 68(c). Finalmente se aplica una capa de color base seguido al color final como se puede observar en la Figura 68(d).

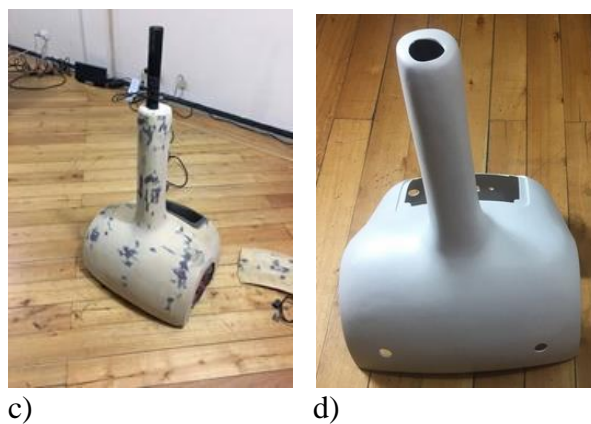


a)



b)

Continúa →



c) d)
Figura 68. Proceso de fabricación del chasis

En la Figura 69 se muestra el ensamble completo de todos los componentes mecánicos y electrónicos del robot de telepresencia.



Figura 69. Implementación del robot de telepresencia completo

4.1.9. Panel de control

El panel de control cuenta con elementos de accionamiento manual, ubicados en la parte inferior del robot como se indica en la *Figura 70*. Los elementos son instalados previamente en la estructura de fibra de vidrio y cumplen con funciones especificadas en la *Tabla 36*.

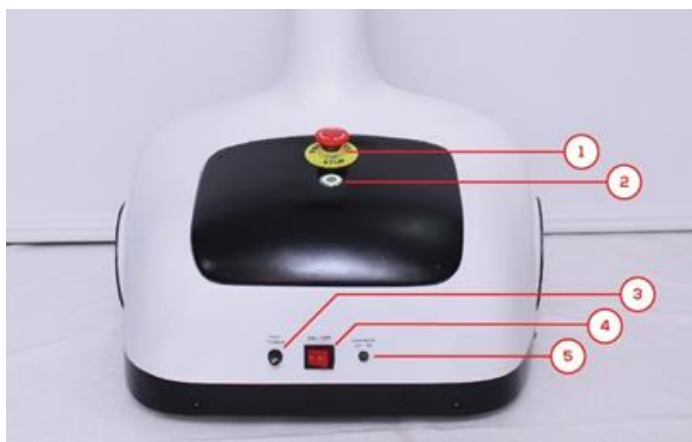


Figura 70. Panel de control del robot

Tabla 36

Funciones del panel de control del robot

| Ítem | Nombre | Función |
|------|---------------------|---|
| 1 | Paro de emergencia | Corta el suministro de energía a los motores DC y reinicia el microcontrolador. |
| 2 | Botón de inicio | Habilita el sistema de movimiento giratorio de la pantalla y cámara |
| 3 | Fusible | Protección del robot contra sobrecargas eléctricas |
| 4 | Switch de encendido | Habilita todas las funciones del robot suministrando energía a todos sus componentes electrónicos |
| 5 | Plug de carga | Permite cargar la batería del robot, utilizando un cargador de 12V, 3A |

4.2. Pruebas y resultados

4.2.1. Pruebas de la batería

La placa principal cuenta con un sistema de alarma sonora para el nivel crítico de batería, dicha alarma alertará al usuario cuando el robot necesite recargarse. En la *Figura 71* se muestran los valores de voltaje obtenidos con un multímetro y con el sistema de medición de la placa, teniendo un error en cada medida de aproximadamente 1%.

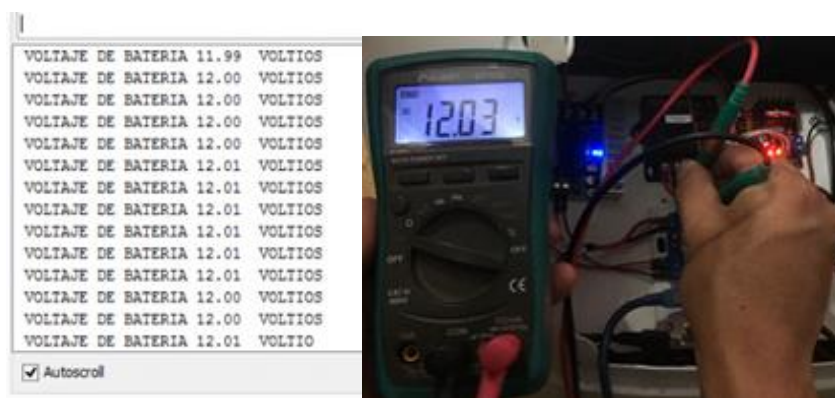


Figura 71. Lectura de medidas de voltaje

A. Nivel de descarga de batería

Se realizaron pruebas con el robot de telepresencia manteniéndolo encendido por un periodo de 60 minutos, accionando todos sus actuadores y registrando los niveles de voltaje de la batería, como se muestra en la Tabla 37. El valor de voltaje de la batería va disminuyendo en función del tiempo de uso.

Tabla 37

Descarga de la batería en función del tiempo

| Tiempo [min] | Voltaje de batería [V] | Porcentaje de carga [%] |
|--------------|------------------------|-------------------------|
| 0 | 12.3 | 100 |
| 10 | 12.1 | 98.4 |
| 20 | 12 | 7.6 |
| 30 | 11.9 | 96.7 |
| 40 | 11.80 | 95.9 |
| 50 | 11.70 | 95.1 |
| 60 | 11.65 | 94.7 |

4.2.2. Prueba del reconocimiento de usuarios

A continuación, se realizan diferentes pruebas para determinar la eficiencia del método Eigenfaces y LBP, debido a que son los más utilizados en el área de visión artificial para la identificación de usuarios. Para ejecutar estas pruebas se requieren requisitos tanto de hardware

como de software para su óptimo funcionamiento, los requisitos del sistema se describen en la Tabla 38 y Tabla 39.

Tabla 38

Requisitos de la placa dedicada para el reconocimiento facial

| Mínimo | | Recomendado | |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Procesador: | BCM2837B0 de 1.4Ghz | Procesador: | Intel Core i7 2.4Ghz |
| Memoria RAM | 1GB | Memoria RAM | 2GB |
| Conectividad: | Wifi 2.4Ghz | Conectividad: | Wifi 5Ghz |
| Multimedia: | OpenGL 1.1, 2.0 | Multimedia: | OpenGL 3.0 |
| Puertos: | USB 2.0 | Puertos: | USB 3.0 |

Tabla 39

Requisitos de software

| Mínimo | | Recomendado | |
|---------------|----------------|--------------------|----------------|
| Python | Versión 2.7.12 | Python | Versión 3.4.16 |
| Ubuntu | Versión 16.4 | Ubuntu | Versión 16.4 |
| OpenCV | Versión 3.4 | OpenCV | Versión 3.4.2 |

Prueba 1

Esta prueba se desarrolla con 20 personas diferentes y para cada una se captura una foto con los mismos parámetros básicos, las fotos son tomadas en vista frontal como se observa en la *Figura 72*, una vez entrenado el sistema se ejecuta cada uno de los algoritmos a evaluar.



Figura 72. Imágenes de entrenamiento para la prueba 1

En la prueba 1 los sujetos de prueba tienen la misma expresión facial, y el entorno de la prueba tiene una iluminación controlada, en la Tabla 40 se muestran los resultados donde el método LBP nos proporciona mejores resultados.

Tabla 40*Resultados de la prueba 1*

| Prueba 1 | Aciertos | Falsos Positivos | Falsos Negativos |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| EigenFaces | 80,90% | 11,00% | 8,10% |
| LBP | 95,32% | 0,80% | 3,88% |

Prueba 2

En la prueba 2 es llevada a cabo con 20 personas diferentes, pero en este caso son tomadas 3 fotos como se muestra en la *Figura 73*.

**Figura 73.** Imágenes de entrenamiento para la prueba 2

En la prueba 2 al disponer de 3 fotos por persona, el sistema nos da un mejor resultado, debido a que tiene mayor información para realizar la comparación, en la Tabla 41 se puede ver los resultados teniendo al método LBP como el método más eficiente.

Tabla 41*Resultados de la prueba 2*

| Prueba 2 | Aciertos | Falsos Positivos | Falsos Negativos |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| EigenFaces | 80,58% | 17,73% | 1,69% |
| LBP | 96,04% | 3,64% | 0,32% |

Prueba 3

En la prueba 3 se capturan 3 fotos para cada persona, las cuales son tomadas con vista frontal y leves inclinaciones del rostro a los costados como se observa en la *Figura 74*, una vez entrenado el sistema se ejecuta cada uno de los algoritmos a evaluar.



Figura 74. Imágenes de entrenamiento para la prueba 3

En la prueba 3 el sistema cuya base de datos contiene 3 perspectivas de vista de los sujetos de prueba, se obtuvo mejores resultados comparado con las pruebas anteriores como se muestra en la Tabla 42, siendo el método LBP el más eficiente en las 3 pruebas ejecutadas.

Tabla 42

Resultados de la prueba 3

| Prueba 3 | Aciertos | Falsos Positivos | Falsos Negativos |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| EigenFaces | 83,18% | 13,00% | 3,82% |
| LBP | 97,95% | 1,00% | 1,05% |

Al analizar los resultados de las 3 pruebas realizadas, se obtiene que el algoritmo de patrones binarios locales supera el 96% de eficiencia, siendo esta la mejor alternativa para el reconocimiento de usuarios.

4.2.3. Prueba del tiempo de respuesta del robot.

Un factor clave en las conexiones a internet es el tiempo que tarda en transferir un paquete de datos dentro de una red, a este término se lo conoce como latencia. Para reducir la latencia se debe analizar los factores que influyen negativamente en la conexión, los más comunes son la tecnología de acceso a Internet siendo estas ADSL o Fibra Óptica, la distancia existente entre los nodos de comunicación, las características del dispositivo que va a conectarse, entre otros, según (Áviles & Pachacama, 2015) se aplica la norma RFC2544 para verificar el rendimiento de una red. Para el envío de datos requeridos para el control del robot se necesita cumplir con ciertos requisitos en el servicio de internet, los cuales se describen en la Tabla 43.

Tabla 43

Requisitos del servicio para el tiempo de respuesta del robot

| Mínimo | | Recomendado | |
|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| Tipo de compartición | 8.1 | Tipo de compartición | 4.1 |
| Velocidad de subida | 200 Kbps | Velocidad de subida | 1 Mbps |
| Velocidad de bajada | 1.1 Mbps | Velocidad de bajada | 4.1 Mbps |

A. Resultados del tiempo de respuesta del robot

Al realizar varias pruebas usando servicios de internet en locaciones aleatorias, se encontró diferentes tiempos de respuesta del robot como se observa en la Tabla 44

Tabla 44

Resultados del tiempo de respuesta del robot

| Servicio de internet | Latencia (ms) | Tiempo de respuesta del robot (s) |
|-----------------------------|----------------------|--|
| Servicio 1 | 13 | 1.5 |
| Servicio 2 | 8 | 0.9 |
| Servicio 3 | 20 | 2.1 |

El tiempo de respuesta del robot aumenta de manera proporcional al tiempo de latencia del servicio de internet, siendo esta una desventaja para la comunicación del robot, cuando el superusuario requiera controlarlo por medio de internet.

4.2.4. Pruebas para la geolocalización

Una de las funciones adicionales del robot de telepresencia es dar a conocer su ubicación, cuando el superusuario lo requiera, para esto se dispone de dos posibles soluciones, sistema GPS o geolocalización por IP. Para el uso del sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global), es necesario que el dispositivo se logre conectar con un mínimo de 3 satélites, según (Thomas & Featherstone, 2005) al calcular el tiempo que demora en recibir la señal de los mismos, se logra obtener la ubicación geográfica por medio de una técnica llamada triangulación. Una de las desventajas de este sistema es la disminución de la señal del satélite en espacios interiores, por lo que este sistema no es aplicable a nuestro robot.

La geolocalización basada en direcciones IP asigna la ubicación geográfica real a la dirección IP del dispositivo que se conecta a internet, en nuestro caso el robot de telepresencia. Al aplicar este sistema de geolocalización no existe limitaciones al estar en espacios interiores, siempre y cuando tenga acceso a internet.

El proceso para adquirir la ubicación del robot se realiza ingresando a la plataforma Google API la misma que nos devuelve datos en formato JSON, siendo estos decodificados se obtiene la latitud, longitud y precisión, para posteriormente enviarlos en formato URL al superusuario.

En la *Figura 75* podemos ver el resultado que podrá visualizar el superusuario, de la ubicación del robot en Google Maps.



Figura 75. Prueba de Geolocalización por IP

A. Resultados de la geolocalización

Se realizan las pruebas de geolocalización por IP en 6 locaciones diferentes, obteniendo los valores tanto de longitud como latitud y mediante la ecuación de Vincenty (Thomas & Featherstone, 2012), se determinó la distancia entre las dos ubicaciones real y medida, obteniendo el error existente en metros, los resultados de las pruebas podemos observar en la Tabla 45.

Tabla 45

Pruebas de la geolocalización

| Ubicación Real | | Geolocalización por IP | | Error absoluto |
|----------------|-------------|------------------------|-------------|----------------|
| Latitud | Longitud | Latitud | Longitud | |
| -0.2057304 | -78.4916925 | -0.2081504 | -78.4955503 | 510 m |
| -0.1620452 | -78.4609191 | -0.1628123 | -78.4620671 | 150 m |
| -0.2599020 | -78.5540822 | -0.2597143 | -78.5518489 | 250m |
| -0.3140227 | -78.4455345 | -0.3166171 | -78.4433353 | 380m |
| -0.2841109 | -78.5452288 | -0.2865677 | -78.5418522 | 460m |

La distancia de error máxima encontrada entre la localización medida y real fue de 510 metros, debido a que la dirección registrada a la IP del computador, pertenece al proveedor del servicio de internet contratado. Siendo este uno de los principales inconvenientes al utilizar Geolocalización por IP.

4.2.5. Resumen

En el presente capítulo se describe la implementación del robot en varias etapas, empezando con la fabricación de la base metálica y el sistema de movimiento giratorio de dos grados de libertad para la pantalla y la cámara. Las mismas fueron diseñadas y construidas usando tecnología de impresión 3D. Posteriormente se diseñaron las placas PCB debidamente etiquetadas para los dos subsistemas. Se elaboró el chasis del robot con fibra de vidrio y se lo añadió a todo el sistema ya ensamblado, para instalar y etiquetar el panel de control.

Una vez ensamblado todo el sistema mecánico y electrónico del robot se continuó con las pruebas de autonomía con la batería seleccionada. Seguidamente el sistema de visión artificial desarrollado en software libre es sometido a varias pruebas de reconocimiento de rostros con diferentes usuarios registrados en la base de datos, modificando la iluminación del entorno y realizando leves inclinaciones del rostro a los costados comprobando la eficacia del mismo. El sistema de videollamada y geolocalización por IP fueron probados en diferentes locaciones para comprobar el tiempo de respuesta del robot a ser controlado por el superusuario y la precisión de la ubicación enviada por la plataforma Google API.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un robot de telepresencia operado remotamente desde internet, con dimensiones de 500 x 500 x 1500 mm y un peso de 35 Kg. El robot cuenta con una plataforma móvil de configuración diferencial, además está equipado con un sistema de regulación de altura y un mecanismo de dos grados de libertad para la cámara web y pantalla, con la finalidad de mejorar el campo visual del usuario al realizar la videollamada. También es capaz de reconocer usuarios utilizando un sistema de visión artificial. Adicionalmente, el robot posee un sistema de geolocalización por ip para conocer la ubicación del mismo y un sistema de sensores infrarrojos para evitar posibles colisiones con su entorno.
- Se diseñó e implementó la estructura de la plataforma móvil en base a las especificaciones del usuario, una vez realizado los cálculos y simulaciones se analizó el nivel de resistencia mecánica, obteniendo un factor de seguridad de $n=11$ y para el análisis de volcamiento $n=1.87$. Por tanto, la estructura resiste el peso del robot y además posee estabilidad ante un posible volcamiento.
- Se diseñó e implementó dos placas PCB, la primera contiene el circuito de control principal del robot, donde se conectan los diferentes controladores tanto para la plataforma diferencial como para el sistema de regulación de altura. La segunda placa electrónica fue diseñada para el control del sistema de dos grados de libertad, que permite tener un campo visual mayor al realizar la videollamada. Las dos placas se encuentran comunicadas de

forma serial a una unidad central de procesamiento y todo el sistema electrónico es abastecido por una batería de 12V 18Ah.

- Se realizaron pruebas de la potencia consumida por el sistema electrónico, donde se obtuvo un consumo máximo de 72.63 W al hacer uso de todas las funcionalidades del robot y un mínimo de 18.26 W cuando el robot se encuentra en estado de espera. Por tanto, posee un tiempo de autonomía promedio de 3.37 horas.
- Se desarrolló un sistema de visión artificial programado en lenguaje Python usando la librería OPENCV, donde se implementó el algoritmo de Viola Jones, para la detección de rostros. Además, se analizaron dos algoritmos para la identificación de usuarios, realizando 3 pruebas con un conjunto de 20 personas con rasgos faciales diferentes, obteniendo como resultado un 97.95% de eficiencia para el algoritmo LBP, frente a un 83.18% de eficiencia con el algoritmo Eigenfaces.
- Se implementó un sistema de geolocalización basado en direcciones IP, con la finalidad de obtener la ubicación aproximada del robot, siempre y cuando el mismo se encuentre conectado a la red global. Para comprobar el grado de aproximación de la ubicación adquirida, se realizaron pruebas en 6 locaciones diferentes y usando la fórmula de Vincenty se encontró un error absoluto promedio de 510 metros.

5.2. Recomendaciones

- Los robots de telepresencia presentan diferentes configuraciones para su desplazamiento, para el presente proyecto se optó por una plataforma diferencial que funciona adecuadamente en superficies regulares. Sin embargo, se recomienda

implementar una configuración de locomoción Ackerman, para acceder a cualquier tipo de terreno.

- Al desarrollar dos placas de control se obtiene dos sistemas aislados físicamente, por lo tanto, se recomienda centralizar el circuito de control en una placa a través de una conexión tipo bus de datos con la finalidad de facilitar el mantenimiento.
- El sistema de suministro de energía está compuesto por una batería de 12v 18A/h dando una autonomía de 3.37 horas al robot de telepresencia. Se recomienda optimizar la carga energética adquiriendo componentes electrónicos con bajo consumo, de esta manera se aumenta la autonomía del robot.
- Actualmente el sistema de reconocimiento de rostros es eficiente, cuando se realiza escaneos de usuarios con vista frontal y entornos con iluminación controlada. El sistema presenta fallas cuando el usuario mira a los costados o si el entorno no se encuentra debidamente iluminado, por lo tanto, se recomienda generar una base de datos propia, con usuarios que realicen ligeros movimientos del rostro y además, modificar la iluminación del entorno con el fin de entrenar al sistema y obtener mejores resultados. También se puede aplicar el método de Myers para el reconocimiento de rostros ligeramente inclinados sin embargo se debe trabajar en el costo computacional que requiere el método.
- El robot cuenta con un sistema de geolocalización basado en direcciones ip, para garantizar el envío de la ubicación al superusuario en espacios interiores, sin embargo, este sistema presenta errores no despreciables en los datos obtenidos de geolocalización,

por lo que se recomienda implementar un sistema de posicionamiento para interiores, consiguiendo una mejor aproximación de la ubicación del robot.

5.3. Trabajos futuros

Se propone como trabajo futuro mejorar las prestaciones del robot con la implementación de un algoritmo SLAM que permita generar un mapa de su entorno permitiendo al robot localizarse y desplazarse dentro del mismo, con la ayuda de una plataforma lidar y haciendo uso de sensores inerciales tales como giroscopios y acelerómetros para generar movimientos con trayectorias precisas y seguras. Además, se puede implementar un sistema de reconocimiento de voz para la ejecución de tareas programadas, aplicando machine learning para la toma de decisiones en la realización de nuevas tareas. Finalmente se puede implementar una estación de carga, de manera que cuando el robot detecte un nivel crítico en su batería, retorne de forma autónoma a la estación de carga sin asistencia del usuario.

Bibliografía

- Romero Muñoz, L., & García Villanueva, M. (s.f.). *Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*. Obtenido de <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/204-numero-2563/397-robots-de-telepresencia.html>
- Adams, M., & Alegría, H. A. (2015). *Reconocimiento frontal de rostros en base a imágenes de alta resolución*.
- Air Force Technolgy*. (Julio de 2016). Obtenido de <http://www.airforce-technology.com/projects/fulmar-x-unmanned-aerial-vehicle-uav/>
- Amate, C. (30 de abril de 2014). *blogthinkbig*. Obtenido de <https://blogthinkbig.com/robot-quirurgico-da-vinci>
- Áviles, J. A., & Pachacama, C. J. (2015). *Guía para la evaluación y rendimiento de una red de datos con tecnología ethernet*. Quito.
- Ballesteros, S. A. (Octubre de 2012). Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16682/PFC_Santiago_Alfaro_Ballesteros.pdf?sequence=1
- Bardales, L., & et all. (2009). *Belomi Asistente Virtual*. Instituto SISE.
- Befi, L. (2013). Obtenido de <http://luisbenavidess.blogspot.com/p/sistemas-mecanicos.html>
- Betancur, A. (3 de Octubre de 2011). Obtenido de <http://xiomarabetancuriearm.blogspot.com/2011/10/la-transformacion-de-movimientos.html>
- Brettis. (2012).

- Carbajal, C. (6 de Abril de 2013). *Threading Programming Using Python*. Obtenido de homepage: <http://homepage.cem.itesm.mx/carbajal/EmbeddedSystems/SLIDES/Python/Threading%20Programming%20using%20Python.pdf>
- Casimiro, R. (2008). *Jmnlab*. Obtenido de www.jmnlab.com/sumo1/sumo1.html
- Consulado General del Ecuador en Barcelona. (15 de diciembre de 2015). *Consulado General del Ecuador en Barcelona*. Obtenido de <http://barcelona.consulado.gob.ec/es/primer-robot-ecuatoriano-mashi-2-01-disenado-en-barcelona-por-ecuatorianos/>
- Dedhia, V. (2015). *Computer Vision Talks*. Obtenido de <http://computervisionwithvaibhav.blogspot.com/2015/08/viola-jones-in-nut-shell.html>
- DiarioTi. (20 de octubre de 2017). Obtenido de <https://diarioti.com/att-y-polycom-se-asocian-en-iniciativa-de-telepresencia/60641>
- Dunlop. (2004). *Conveyor Belt Technique: Design and Calculation*. United Kingdom.
- emol . (17 de mayo de 2017). Presentan robot de telepresencia para ser utilizado en hospitales. *emol*.
- Espinoza, D. E., & Jorquera, P. I. (2015). *Reconocimiento Facial*.
- Fernández, M., Fernández, D., & Valsamedá, C. (2010). *Planificación de trayectorias para un robot móvil*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Festo. (2012). Obtenido de <https://www.festo.com/group/es/cms/10233.htm>
- Forero, A. (2 de octubre de 2012). Obtenido de <http://jafr-larobotica.blogspot.com/2012/10/lo-que-es-robotica.html>
- García, Y. (17 de abril de 2017). Obtenido de <http://pontegeekpty.com/reconocimiento-facial-del-fbi-la-mira/>
- Ipac Duferco Group. (2014). Obtenido de <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=9>

Kim, T. (2015).

magazine, D. a. (14 de Diciembre de 2014). PadBot, robot de telepresencia basado en iOS para comunicaciones de vídeo y voz peer-to-peer. *Digital av magazine*. Obtenido de <http://revistayumecr.com/vivir-personaje-favorito-gatebox-virtual-home-robot/>

MathWorks. (2017). Obtenido de <https://es.mathworks.com/discovery/reconocimiento-facial.html>

Monsó, J. (2001). *Sistemas de identificación y Control automáticos*. Barcelona: Marcombo S.A.

Muñoz, & García. (2015). Obtenido de <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/204-numero-2563/397-robots-de-telepresencia.html>

National Aeronautics and Spacial Administration-NASA. (2009). *NASA Oficial*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/centers/ames/K10/>

Ncvt. (10 de Mayo de 2017). *noticias de la ciencia y tecnología*, 1.

Nuño, E., & Basañez, L. (s.f.). *ReseachGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/33421071_Teleoperacion_de_robots_tecnicas_a_plicaciones_entorno_sensorial_y_teleoperacion_inteligente

Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo S.A.

Ollero Baturone, A. (2005). *Robótica.Manipuladores y Robots Móviles*. Barcelona: Marcombo.

Ortega, E. N. (2004). Obtenido de <file:///C:/Users/Core%20i7%20Dell/Downloads/109035639-2004-Teleoperacion-Tecnicas-Aplicaciones-Entorno-Sensorial-y-Teleoperacion-Inteligente.pdf>

Ortega, G. (20 de mayo de 2017). Obtenido de <http://acodigo.blogspot.com/2013/06/deteccion-de-rostros.html>

- Ortiz Pámanez, D. A. (2014). *Teleoperación de un manipulador de 5 grados de libertad utilizando plataforma virtual*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pavón, S. D. (2017). *Reconocimiento facial mediante el Análisis de*.
- Ramirez, C. (2013).
- Rod, F. (2014). *Montaje y Puesta en Marcha de Sistemas Robóticos y sistemas de visión*. Mexico: IC Editorial.
- Rodríguez, M. P. (11 de mayo de 2012). *los tecnológicos*. Obtenido de <http://lostecnologicoscmc.blogspot.com/2012/05/historia-de-los-robots-composiciones-y.html>
- Rojas, A. R.-F. (16 de Julio de 2009). *Despliegue de la función calidad (QFD)*. Madrid. Obtenido de asesordecadidad.
- Sierra, X., & Pillajo, C. (2014). *Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <http://carlospillajo.info/wp-content/uploads/sites/1369/2014/12/SistTeleoperadosDelayComun-CP.pdf>
- Silicon. (9 de Septiembre de 2017). Buddy, el primer robot doméstico “low cost”. Obtenido de <http://mercadonegro.pe/noticia/8707/los-hologramas-llegan-a-revolucionar-la-publicidad-en-el-peru>
- Society of Robots. (2014). Obtenido de http://www.societyofrobots.com/mechanics_dynamics.shtml
- Techno Trends. (2010). *Soluciones integradas de telepresencia*. Obtenido de <http://www.salasdetelepresencia.com/que-es-la-telepresencia.html>
- Thomas, C. M., & Featherstone, W. E. (2005).

Thomas, C. M., & Featherstone, W. E. (2012). Obtenido de Validation of Vincenty's formulae for the geodesic using a new fourthorder

Tipler, P., & Mosca, G. (2016). *Física para la Ciencia y Tecnología*. Barcelona: Reverté.

Valencia, Á., & Idrovo, R. (Febrero de 2017). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/317850905_Disenio_e_implementacion_de_un_sistema_de_reconocimiento_y_manipulacion_de_frutas_utilizando_vision_artificial_y_brazo_robotico_industrial

Vásquez López, M. Á. (marzo de 2014). Obtenido de <http://biblioteca.cio.mx/tesis/15950.pdf>

Yacuzzi, E. (1997). QFD: Conceptos, Aplicaciones y Nuevos Desarrollos.