



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Diseño de una lámpara de luz oral con posicionamiento autónomo para la reducción de contagios en consultorios dentales utilizando robotic operating system en Raspberry Pi

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTORES

Battistolo Quiroz, Fabrizio Pietro

ORCID: 0000-0001-9512-5057

Cuba Rojas, César David

ORCID: 0000-0002-3419-4013

ASESOR

Sotelo Valer, Freedy

ORCID: 0000-0003-3079-2857

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Battistolo Quiroz, Fabrizio Pietro

DNI: 76277045

Cuba Rojas, César David

DNI: 76622745

Datos de asesor

Sotelo Valer, Freedy

DNI: 25804755

ORCID: 0000-0003-3079-2857

Datos del jurado

JURADO 1

Castro Salguero, Robert Gerardo

DNI: 06756101

ORCID: 0000-0001-9909-3435

JURADO 2

Mandujano Neyra, Demetrio Hugo

DNI: 07601347

ORCID: 0000-0002-3096-5626

JURADO 3

Rivas León, Javier Hipólito

DNI: 10250991

ORCID: 0000-0002-8365-4346

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.11.02

Código del Programa: 712046

DEDICATORIA

Dedicamos la presente tesis a mi familia, la cual me ha forjado y comparte conmigo cada logro que alcanzo. A mi padrino, quien fue mi ejemplo a seguir y partió al encuentro con el señor.

Battistolo Quiroz, Fabrizio Pietro

Dedico esta tesis a mis familiares, compañeros y amigos quienes me brindaron apoyo y conocimientos a lo largo de mis cinco años de estudio.

Cuba Rojas, César David

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los docentes que formaron parte de este proyecto, a nuestro asesor quien constantemente nos alentó a continuar por este camino.

Battistolo Quiroz, Fabrizio Pietro

Cuba Rojas, César David

INDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Delimitación del problema general y específicos.....	1
1.1.1 Problema general	3
1.1.2 Problemas específicos.....	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Importancia y justificación del estudio	4
1.3.1 Importancia del estudio	4
1.3.2 Justificación del estudio	5
1.4 Alcances y Limitaciones de la Investigación.....	5
CAPÍTULO II: CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Marco histórico	7
2.2 Antecedentes de la Investigación.....	9
2.2.1 Antecedentes Internacionales	9
2.2.2 Antecedentes Nacionales.....	10
2.1 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio.	12
2.1.1 Disposiciones para una correcta atención en un consultorio dental.	12
2.1.2 Enfermedades infecciosas transmisibles durante la atención médica dental	13
2.1.3 Brazo robótico	16
2.2.3 Sensores Externos.....	49
2.2.4 Algoritmos de evasión de obstáculos	57
2.2.5 Robotic Operating System Framework (ROS).....	61
2.2.6 Microcontrolador y Raspberry Pi	64
2.3 Definición de términos básicos.....	65
CAPÍTULO III: CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	67
3.1 Tipo, método y diseño de la investigación.....	67

3.2 Descripción del procedimiento de diseño	67
CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO AUTÓNOMO DE LA LÁMPARA	69
4.1 Análisis de área de trabajo de la lámpara de luz oral y estado actual	69
4.2 Diseño de estructura motriz del sistema autónomo y cálculos de cinemática	71
4.2.1 Requerimientos	71
4.2.2 Elección de la estructura mecánica de la lámpara de luz oral	72
4.2.3 Disposición mecánica de motores	74
4.2.4 Selección de material de la estructura	74
4.2.5 Cálculo y modelamiento 3D de la estructura mecánica	75
4.2.6 Cinemática de la estructura.....	81
4.3 Análisis de torques y selección de actuadores	83
4.3.1 Cálculo del torque que requiere cada motor	83
4.4 Evaluación y selección de sensores	96
4.5 Selección del controlador e integración con ROS	100
4.6 Esquema de conexión de los sensores	102
4.7 Desarrollo de algoritmo de detección de obstáculos.....	104
CAPÍTULO V: CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	112
5.1 Análisis de Resultados de la etapa Mecánica y de accionamiento	112
5.2 Etapa de simulación	113
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES.....	113

ANEXO

Anexo 1: Datasheet Sensor Grid-EYE AMG88	121
Anexo 2: Datasheet Sensor ultrasonido Maxbotix MB1614	123
Anexo 3: Datasheet Raspberry Pi 4 B.....	125
Anexo 4: Especificaciones de reductores CSF	126
Anexo 5: Datasheet NEMA 23	127

INDICE DE FIGURAS

Figura N 1: Estructura convencional de las primeras sillas dentales	7
Figura N 2: Silla diseñada por James Bear Morrison	8
Figura N 3: Sillón dental actual y sus partes.....	8
Figura N 4: Estructura de un brazo robótico.....	17
Figura N 5: Tipos de articulaciones	17
Figura N 6: Configuración más frecuente en robots industriales	18
Figura N 7: Robots planares redundantes	19
Figura N 8: Despiece Reductor Armónico.....	24
Figura N 9: Esquema Reductor Armónico.....	24
Figura N 10: Reducto Cyclo.	25
Figura N 11: Esquema de cilindro neumático de doble efecto	28
Figura N 12: Motor de paletas	28
Figura N 13: Motor de pistones axiales	29
Figura N 14: Actuador rotativo de tipo piñón-cremallera	30
Figura N 15: Motor de corriente continua	33
Figura N 16: Motor DC – Esquema y funciones de transferencia.....	34
Figura N 17: Esquema de motor paso a paso de imanes permanentes con cuatro pases	35
Figura N 18: Motores sin escobillas con su etapa de control y potencia	37
Figura N 19: Disposición de un codificador óptico (encoder incremental).....	40
Figura N 20: Salida A y B de un encoder y valor Q del biestable D	41
Figura N 21: Esquema de funcionamiento de un resolver	43
Figura N 22: Esquema de funcionamiento de un Inductosym	45
Figura N 23: Esquema de funcionamiento de un LVDT	46
Figura N 24: Pinzas neumáticas para robots.....	49
Figura N 25: Ejemplo de sensor pasivo y activo	50
Figura N 26: Estructura de sistema piezoeléctrico excitado mediante voltaje y relación entre voltaje-vibración	54
Figura N 27: Velocidad del sonido con relación a la temperatura en el aire	54
Figura N 28: Partes de un módulo de sensor infrarrojo	56

Figura N 29: Potenciómetro lineal de censado de fuerza.....	57
Figura N 30: Sensor de fuerza básico	57
Figura N 31: Ejemplo de trayectoria a recorrer utilizando un algoritmo “dist-BUG”	59
Figura N 32: Histograma polar generado en relación con 2 obstáculos	60
Figura N 33: Técnica de banda de burbujas en el cálculo de trayectoria.....	61
Figura N 34: Diagrama de bloque de un microcontrolador	64
Figura N 35: Partes y componentes de un Raspberry Pi.....	65
Figura N 36: Dimensiones de una silla dental estándar Belmont	70
Figura N 37: Dimensiones de portaherramientas estándar Belmont.....	70
Figura N 38: Comparación entre atención tradicional (izquierda) y atención asistida (derecha)	71
Figura N 39: Estructura mecánica de la lámpara de luz oral	73
Figura N 40: Disposición de los motores en la lámpara de luz dental.....	74
Figura N 41: Diseño de la estructura de la base.....	76
Figura N 42: Diseño de eslabón 1	77
Figura N 43: Análisis de Tensión en el eslabón 1 en SolidWorks.....	77
Figura N 44: Diseño del eslabón 2.....	78
Figura N 45: Diseño de la lámpara	79
Figura N 46: Diseño de conector	79
Figura N 47: Diseño de tapa	80
Figura N 48: Sistemas de coordenadas del sistema según D.H.	81
Figura N 49: Sistemas de coordenadas del sistema según D.H.	82
Figura N 50: Características técnicas de las piezas mediante el Software SolidWorks	84
Figura N 51: Sistema posición crítica.....	86
Figura N 52: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 4 (vista perfil izquierdo)	86
Figura N 53: Diagrama de distancias con respecto al EJE 4 (vista planta)	87
Figura N 54: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 3 (vista perfil izquierdo)	88
Figura N 55: Diagramas de distancias con respecto al EJE 3 (vista planta).....	89
Figura N 56: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 2 (vista perfil izquierdo)	91
Figura N 57: Diagramas de distancias con respecto al EJE 2 (vista planta).....	91
Figura N 58: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 1 (vista perfil izquierdo)	94
Figura N 59: Diagramas de distancias con respecto al EJE 1 (vista planta).....	94

Figura N 60: Patrón de detección de sensor A02YYUW	97
Figura N 61: Conexión de procesador y sensores a nivel visual	102
Figura N 62: Diagrama electrónico conexión entre procesador y sensores	103
Figura N 63: Diagrama electrónico acercamiento a procesador	104
Figura N 64: Diagrama de flujo de funcionamiento del algoritmo de evasión autónoma ..	105
Figura N 65: Pantalla principal de Oracle VM ejecutando una máquina virtual	108
Figura N 66: Entorno Visual Studio Code visualizando carpetas	109
Figura N 67: Sentencia "catkin_make" utilizada para compilación del proyecto	109
Figura N 68: Estructura de carpetas y repositorios para la simulación	109
Figura N 69: Configuración del archivo lanzador	110
Figura N 70: Configuración del archivo de mundo o entorno	110
Figura N 71: Declaración de eslabones del objeto de simulación	111
Figura N 72: Representación 3D del modelo en la simulación	111
Figura N 73: Características del eslabón 1, a) Eslabón 1 con acero al carbono b) Eslabón 1 con aluminio 6061	112

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1	Odontólogos diagnosticados con SARS-COV-2 en Perú según regiones.....	3
Tabla N° 2	Sistemas de transmisión para robots	21
Tabla N° 3	Características de reductores para robótica	23
Tabla N° 4	Características de distintos tipos de actuadores para robots.....	38
Tabla N° 5	Tipos de sensores propioceptivos para robots	39
Tabla N° 6	Comparación entre distintos sensores óptico de posición angular	44
Tabla N° 7	Sistemas de sujeción para robots.....	48
Tabla N° 8	Diferencias entre sensor activo y pasivo	51
Tabla N° 9	Parámetros del sistema	72
Tabla N° 10	Comparación de materiales para la estructura mecánica del sistema.....	75
Tabla N° 11	Parámetros de D-H.....	82
Tabla N° 12	Características de masa, área y volumen de las piezas de la lámpara de luz oral	85
Tabla N° 13	Comparación entre modelos de sensores de ultrasonido.....	98
Tabla N° 14	Comparación entre modelos de sensores IR térmicos.....	99
Tabla N° 15	Comparación entre modelos de RaspberryPi	101

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo el diseño de un sistema autónomo capaz de detectar obstáculos para el posicionamiento de una lámpara de sillón dental utilizando arreglos de sensores, para este fin se planteó el diseño estructural mecánico, electrónico y además se desarrolló el algoritmo de evasión de obstáculos. Esto se encuentra frente al alarmante nivel de contagios de enfermedades infecciosas que se observa durante el transcurso de la pandemia ocasionada por el SARS-COV 2, haciendo más conscientes a las personas tanto como personal de salud sobre los riesgos de contagios existentes no solo de dicha enfermedad, sino de todas aquellas a las que nos encontramos expuestas en un lugar tan vulnerable como es el consultorio dental. Para el sistema mecánico se realizó el diseño del brazo que sostiene la lámpara, siguiendo los lineamientos para el mismo y se realizó un análisis de fuerzas para definir su viabilidad. Para la comunicación del sistema con su entorno se utiliza una serie de sensores, siendo un sensor de presión o fuerza encargada de determinar la posición del paciente a lo largo de la silla dental y como parte del sistema de detección de obstáculos se utiliza un sensor infrarrojo térmico que funciona como una malla sobre el área de trabajo detectando en forma frontal cualquier objeto que se acerque, además se tiene en los laterales de la lámpara sensores de ultrasonido que pueden detectar la presencia y acercamiento de objetos donde el sensor infrarrojo no puede llegar a detectar, cubriendo los puntos ciegos. Luego se planteó el algoritmo sobre el cual se rige el funcionamiento siendo, contemplando la utilización de ROS como herramienta de diseño que facilita la obtención de módulos de código, considerando RaspberryPi como interfaz para la comunicación de esta herramienta con los diversos sensores y actuadores. Como resultado, se tiene que de ser implementado el prototipo reducirá el riesgo de contagio de enfermedades infecciosas ya que evita el contacto del odontólogo durante la atención médica con superficies las cuales no son fáciles de esterilizar, como lo es la lámpara, además de presentar una ayuda al momento de la atención odontológica al reducir las acciones a realizar por dicho personal.

Palabras clave: odontología, enfermedad infecciosa, evasión y obstáculos.

ABSTRACT

The objective of this thesis was the design of an autonomous system capable of detecting obstacles for the positioning of a dental chair lamp using arrays of sensors. For this purpose, the mechanical and electronic structural design was proposed, and the algorithm for avoiding obstacles was also developed. This is in the face of the alarming level of contagion of infectious diseases that is observed during the pandemic caused by SARS-COV 2, making people as well as health personnel more aware of the risks of existing contagions, not only of said disease, but of all those to which we are exposed in a place as vulnerable as the dental office. For the mechanical system, the design of the arm that supports the lamp was carried out, following the guidelines for it, and an analysis of forces was carried out to define its viability. For the communication of the system with its environment, a series of sensors is used, being a pressure or force sensor in charge of determining the position of the patient along the dental chair and an infrared sensor is used as part of the obstacle detection system. that works as a mesh over the work area, detecting frontally any object that approaches, in addition there are ultrasound sensors on the sides of the lamp that can detect the presence and approach of objects where the infrared sensor cannot reach detect, covering blind spots. Then the algorithm on which the operation is governed is proposed, contemplating the use of ROS as a design tool that facilitates obtaining code modules, considering RaspberryPi as an interface for the communication of this tool with the various sensors and actuators. As a result, if the prototype is implemented, it will reduce the risk of contagion of infectious diseases since it avoids the contact of the dentist during medical care with surfaces that are not easy to sterilize, such as the lamp, in addition to presenting a It helps at the time of dental care by reducing the actions to be carried out by said personnel.

Keywords: dentistry, infectious disease, obstacle avoidance.

INTRODUCCION

El mundo ha percibido en el transcurso de los últimos años el impacto de la pandemia ocasionada por el virus SARS-COV-2, el cual no solo ha tomado vidas, sino que también ha impactado negativamente en diversos modelos de servicios, incluyendo al rubro de la salud bucal, el cual es nuestro foco de atención en esta tesis. Se sabe que en países como Estados Unidos un 68% de médicos tuvo que reducir sus horas de trabajo. No solamente las personas sino instituciones y consultorios dentales han cesado sus actividades al no contar la tecnología requerida. En adición a lo mencionado, el riesgo de contagio no solo se limita al virus SARS-COV-2, sino que sigue persistiendo en la actualidad incluyendo enfermedades como Hepatitis B, Hepatitis C, VIH, entre otros. Es de conocimiento público los métodos de transmisión, siendo uno de los más comunes la interacción con superficies contaminadas, sin embargo, existen evidencias de casos de contagios de enfermedades en consultorios dentales como los ocurridos en Oklahoma donde se suscitó un contagio masivo de 70 personas.

Los sucesos antes mencionados hacen evidente el impacto y riesgo existente de contraer estas enfermedades infecciosas, en adición se ha de considerar que el riesgo de contagio aumenta bajo la mala praxis de medidas de bioseguridad, las cuales han ocurrido en países donde los protocolos y equipos son más avanzados en comparación con el Perú, por lo que se puede estimar que en el contexto nacional los niveles de contagios podrían ser mayores a pesar de no documentarse adecuadamente.

Por lo mencionado se propone en el presente trabajo de tesis el diseño de un sistema autónomo de reposicionamiento de la lámpara utilizada durante la intervención odontológica, mediante la detección de obstáculos. De esta forma reduciendo el contacto con superficies y disminuyendo el riesgo de contagios de enfermedades infecciosas.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo comprende la problemática identificada motivo de la realización de la tesis. Además, se contemplan los objetivos planteados, justificación y limitaciones identificadas.

1.1 Delimitación del problema general y específicos.

Es de conocimiento público que en el transcurso de los últimos dos años, debido a la rápida evolución del virus SARS-COV-2 y pandemia ocasionada por el mismo, muchos modelos de servicios se han visto afectados, más aún aquellos vinculados al rubro de la salud como es la atención médica dental y bucal, como indica Rubin (2020) en su artículo, en el cual menciona que en una encuesta virtual realizada por la Asociación Médica de Texas, en Estados Unidos, se dio a conocer que alrededor del 68% del personal de salud médica se vio en la obligación de reducir sus horas de trabajo; el 62% percibió una disminución en sus ingresos; de igual manera, algunos indicaron que tuvieron que clausurar definitivamente sus consultorios. Del mismo modo Romero (2021) comenta respecto al impacto negativo que tuvo esta pandemia en la gestión realizada por las clínicas dentales, de las cuales aquellas donde los protocolos y medidas de bioseguridad no eran eficientes, tuvieron que invertir en cambios de estructura y de equipamiento para hacer frente a la nueva necesidad creada por los riesgos y miedos que se encontraban presentes, implicando el cierre de muchas otras clínicas que imposibilitados de realizar dicha inversión devino en el cese sus actividades. Así mismo, indica que la bioseguridad pasa de ser objetivo de interés del gremio de profesionales de la salud, a ser símbolo de calidad y seguridad para el público en general.

Si bien la pandemia ocasionada por el virus SARS-COV-2 marcó un cambio en la percepción de la bioseguridad, no se debe olvidar que existen más agentes infecciosos los cuales pueden ser transmitidos durante la práctica de la atención odontológica, como indican Acosta y Carpio (2015), durante el ejercicio de esta labor se encuentra la interacción con componentes como la sangre, saliva y mucosas las cuales contienen las bacterias y virus que originan enfermedades como Hepatitis B, Hepatitis C, VIH (virus

de inmunodeficiencia humana), Legionelosis, entre otros. Así mismo, Volgenant & De Soet (2018) en su publicación realizada en la Librería Nacional de Medicina (NLM) informan sobre los diversos tipos de transmisión, considerando las de contacto directo o de sangre a sangre como las más riesgosas, en donde el paciente u odontólogo interactúan con un instrumento o superficie contaminada. Según mencionan han sido reportados casos de contagios como los sucedidos en Virginia Occidental en 2013, donde luego de un voluntariado de atención dental se reportaron 4 casos de Hepatitis B en adultos, un segundo reporte realizado por el Departamento de Salud de Oklahoma informa se detectaron 70 casos de infección de Hepatitis C.

Se puede confirmar en base a los hechos que efectivamente existe el riesgo de contagio de enfermedades infecciosas debido a los virus y bacterias que, a través de la interacción con un paciente portador de las mismas, pasan a habitar las superficies del entorno laboral del odontólogo, inclusive por tiempos prolongados como evidencia Belibasakis, Kistler, Laheij, Soet, Välimaa & European Oral Microbiology Workshop (EOMW) (2012) quienes indican que los virus como el herpes en sus tipos simplex tipo 1 (HSV-1) y tipo 2 (HSV-2) los cuales están relacionados principalmente con la transmisión cruzada y la hepatitis B se pueden contraer en un consultorio dental, demostrando además, que el virus de la hepatitis B posee una capacidad de sobrevivir y permanecer infeccioso en sangre seca cuando se encuentra a una temperatura ambiente en superficies durante por lo menos una semana o probablemente un tiempo mayor. Ciertamente esta información resulta alarmante, más aún si se toma en cuenta la cantidad de pacientes que podrían ser atendidos en un consultorio dental durante el transcurso de una semana.

La aplicación de medidas de seguridad es una labor estrechamente vinculada a la acción humana, que depende mucho del conocimiento del profesional de la salud y como tal, se encuentra sujeta a errores, como es evidenciado por Bedi, Thusu & Singh (2012) en su publicación realizada en el “British Dental Journal”, donde recopilan una serie de casos reportados de incidentes que ocurrieron en consultorios y clínicas dentales vinculados a una mala gestión en el control de infecciones (relacionado a bioseguridad).

Se ha de tener en consideración que los casos reportados han tenido lugar de ocurrencia en países donde el nivel de calidad y medidas de bioseguridad suele ser alto, en comparación con el Perú cuyo sistema de Salud posee muchas falencias en la actualidad,

como comenta Zambrano (2021) quien realiza un estudio respecto a la tasa de letalidad de odontólogos contagiados con SARS-COV-2 evidenciando que durante el mes de junio de 2020 se observaron 157 casos positivos de los cuales 16 personas fallecieron representando un 10% del total mientras que en agosto del mismo año esta cifra aumentó a 384 casos positivos con una letalidad de 11% siendo 44 defunciones reportadas durante ese periodo. Esta información se encuentra detallada en la tabla mostrada a continuación.

Tabla N° 1

Odontólogos diagnosticados con SARS-COV-2 en Perú según regiones

REGIONES NATURALES	JULIO						OCTUBRE					
	Positivos	%	UC I	%	Fallecidos	%	Positivos	%	UC I	%	Fallecidos	%
COSTA	100	64	5	71	9	50	274	71	3	50	34	77
SIERRA	32	20	1	14	6	33	75	20	3	50	7	16
SELVA	25	16	1	14	3	17	35	9	0	0	3	7
	157		7		18		384		6		44	

Fuente: Zambrano (2021)

En base a lo expuesto, se puede inferir que la reducción de la interacción del profesional dental con las superficies aminora el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, por lo que se propone la generación de un sistema autónomo de control de la lámpara de las sillas dentales, evitando así el contacto con una de las herramientas más utilizadas durante la atención dental.

1.1.1 Problema general

¿Cómo diseñar una lámpara de luz oral con posicionamiento autónomo para la reducción de contagios en consultorios dentales utilizando Robotic Operating System en Raspberry Pi?

1.1.2 Problemas específicos

a) ¿Cómo diseñar una estructura mecánica para la lámpara de luz oral la cual pueda mantenerse estable junto con el sillón dental durante su movimiento?

- b) ¿Cómo determinar el sistema de suministro energético y diseñar un sistema electrónico que permita la movilidad de la lámpara de luz oral de manera precisa?
- c) ¿Cómo desarrollar los algoritmos que, implementados a través de Robotic Operating System en Raspberry Pi, permitan la detección de obstáculos y posicionamiento de la lámpara de luz oral?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una lámpara de luz oral con posicionamiento autónomo para la reducción de contagios en consultorios dentales utilizando Robotic Operating System en Raspberry Pi.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Diseñar una estructura mecánica para la lámpara de luz oral la cual pueda mantenerse estable junto con el sillón dental durante su movimiento.
- b) Determinar el sistema de suministro energético y diseñar un sistema electrónico que permita la movilidad de la lámpara de luz oral de manera precisa.
- c) Desarrollar los algoritmos que, implementados a través de Robotic Operating System en Raspberry Pi, permitan la detección de obstáculos y posicionamiento de la lámpara de luz oral.

1.3 Importancia y justificación del estudio

1.3.1 Importancia del estudio

La importancia de esta tesis estriba en que, luego de su implementación, podrá reducir las posibilidades de contraer enfermedades infecciosas en uno de los entornos más vulnerables en los que se puede encontrar una persona, como es un consultorio dental, a través de la aplicación de técnicas y tecnologías reutilizables en otros ámbitos, con el fin de brindar soporte a una de las ramas de la medicina más afectadas a raíz de la pandemia ocasionada por el virus SARS-COV-2.

1.3.2 Justificación del estudio

- Justificación Tecnológica

La presente investigación propone el diseño de la lámpara inteligente cuyo control se basa en la integración de Robotic Operating System aplicado en Raspberry Pi tiene como base un sistema de evasión de obstáculos que, lejos de ser una aplicación limitada al rubro dental, podrá ser utilizado en diversos escenarios donde una tecnología similar sea requerida en conjunto con distintos efectores o herramientas, presentando así la oportunidad de mejora del presente diseño propuesto y generando un beneficio diversificado.

- Justificación Sanitaria

La tesis propuesta representará una medida de prevención adicional frente a los riesgos infecciosos que existen en la práctica de la labor médico-dental, protegiendo así la salud de los pacientes y profesionales de la salud involucrados y contribuyendo a mejorar la calidad del servicio de atención estomatológica.

- Justificación Económica

El presente diseño al formar parte de un sistema más complejo, que es la silla dental, puede ser adoptado por empresas que diseñan estos equipamientos y deseen tomar la propuesta de lámpara autónoma aplicándola a sus productos, lo que representará un valor agregado al catálogo que ofrecen, impactando positivamente en sus ventas.

1.4 Alcances y Limitaciones de la Investigación

Debido a la naturaleza de la investigación y las condiciones según las cuales la lámpara de luz oral autónoma operará se tienen limitaciones como lo son un espacio reducido de operación, teniendo gran cercanía con el doctor y paciente, por lo que la velocidad de movimiento deberá ser relativamente baja. En adición, el efector del sistema propuesto, que es la lámpara, debe poseer un peso y costo reducido, por lo que la utilización de cámaras de visión artificial no es factible debiendo utilizar arreglos de sensores en su defecto donde el paciente deberá encontrarse

correctamente recostado sobre el sillón para la óptima detección del paciente y su diferenciación con el odontólogo.

CAPÍTULO II: CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se menciona una breve introducción a la historia de las sillas dentales, así como una recopilación de trabajos relacionados a la presente tesis y el marco teórico que comprende las bases de la investigación.

2.1 Marco histórico

Las sillas dentales son un implemento indispensable y necesario en la práctica de la salud dental actual, sin embargo, esto no fue siempre así. El primer prototipo de silla o sillón dental fue elaborado por Josiah Flagg alrededor del año 1790, el cual era una modificación de una silla de escribir, muy similar a lo coloquialmente conocido como una carpeta, donde se adiciona un reposa cabeza aumentando el alto del espaldar como se observa en la figura 1.



Figura N 1: Estructura convencional de las primeras sillas dentales

Fuente: Banerjee, Dhingra y Jain (2013).

Luego de la primera versión existieron una gran cantidad de diseños de los cuales se puede considerar al diseño propuesto por James Bear Morrison en 1867 (Banerjee et. al). Este diseño comprende una estructura metálica la cual adiciona un reposa cabeza y reposa pies, teniendo la facilidad de ajustar en ángulo de inclinación y posición de la silla mediante el accionamiento de palancas ubicadas en la parte inferior como se observa en la figura 2.



Figura N 2: Silla diseñada por James Bear Morrison

Fuente: Bairsto (2021)

A lo largo del siglo XX se presentaron una serie de propuestas las cuales ofrecían nuevas herramientas y funcionalidades a las sillas dentales, en este punto se adicionaron las mesas porta herramientas, sistemas hidráulicos para manejo de fluidos y la lámpara de luz oral. Si bien existieron muchas entidades y empresas que innovaron en este rubro, se le atribuye a los implementos.



Figura N 3: Sillón dental actual y sus partes

Fuente: Eurodent (2022)

2.2 Antecedentes de la Investigación

La presente tesis considera antecedentes internacionales y nacionales que brindan soporte al diseño de la lámpara de luz oral autónoma, así como su simulación.

2.2.1 Antecedentes Internacionales

Ambroziak et al. (2018), proponen en su artículo titulado “SLAM and obstacle detection for tall autonomous Robotic medical assistant” donde proponen la creación de un sistema de navegación autónomo aplicado a un robot de 150 cm de altura. Proponen como solución un sistema híbrido de escáner, cámaras y sensores de distancia, apoyándose en Robotic Operating System (ROS) para su diseño. Los autores concluyen que gracias a la utilización del sistema ROS es posible generar un prototipo de robot en un espacio de tiempo limitado debido a la gran cantidad de contribuyentes que posee este entorno de trabajo.

Fang, Han, Liu, Wang, & Zhao. (2021), en el artículo publicado en la revista “Sensors” de su autoría tuvo como objetivo el diseño de un robot autónomo el cual posee la capacidad de evitar obstáculos a través de la utilización de un sistema de sensores múltiples en consideración a su aplicación en un entorno que contenga diversos obstáculos como lo es una vía de tránsito vehicular. En dicho artículo se propone la utilización de sensores de ultrasonidos en conjunto con sensores infrarrojos en una configuración “CascadeClassifier” encargado de entrenar el sistema en base a las muestras obtenidas por los sensores. En su investigación concluyó que se puede conseguir con efectividad la implementación de un robot que sortee con éxito los obstáculos a través de la configuración de sensores propuesta.

Galtarossa (2018), en su tesis de Máster ofrece un estudio que presenta como objetivo el realizar pruebas de distintos algoritmos de evasión de obstáculos, determinando el mejor que aplicado a un dispositivo de navegación autónoma se consiga que dicho robot se desplace por áreas complejas sin inconvenientes. Dentro de esta tesis se detalla el funcionamiento de algoritmos como “Método de campo potencial”, “Histograma de campo de Vectores” y “Enfoque de ventanas dinámicas”, todos estos aplicados mediante el soporte de un sensor

LiDAR. Como resultado final se generó el algoritmo de navegación autónomo, el cual se puso a prueba en diferentes escenarios permitiendo con éxito la movilización del robot autónomo, presentando algunas oportunidades de mejora debido al ambiente donde se hicieron las pruebas, además de la complejidad de la tarea para la que fue aplicado este sistema.

Yang (2020), en su investigación en para obtener el grado de maestro en Tecnología de la información y comunicación propone el diseño de un sistema de evasión de obstáculos, en particular humanos, aplicado a los robots utilizados en la industria (fábricas), donde requiere la asignación de espacios dedicados a los robots que por motivos de seguridad no deben de ingresar humanos a dichos ambientes. Con el fin de alcanzar el objetivo se introdujo un método de planeamiento de ruta llamado “Árbol aleatorio de rápida exploración basado en transición”, proponiendo un prototipo el cual fue puesto a prueba en un ambiente simulado a través de la herramienta de visualización RViz. Gracias a su estudio fue posible confirmar en base a las pruebas la efectividad del método aplicado donde menciona el factor de distancia de seguridad se encuentra estrechamente relacionado a la velocidad a la que opera el robot y a la que se movilizan los obstáculos.

2.2.2 Antecedentes Nacionales

Acevedo (2018) En su tesis de pregrado para obtener el título profesional de cirujano dentista “Grado de contaminación cruzada en las unidades dentales de la clínica odontológica de la universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua 2017.” de la Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú. Cuyo objetivo fue estimar el grado de contaminación cruzada en las unidades dentales de la clínica odontológica mediante el género Streptococcus. En la cual, se utilizó la técnica observacional la cual permitió cuantificar la cantidad de estreptococo viridans. Para la toma de muestras se utilizó el método de torunda de algodón, la cual facilitó la toma de estas en zonas complicadas y se utiliza 2 tipos de agar (sangre, salivarius) para la preparación de las muestras. El estudio concluyó que el grado de contaminación cruzada en las unidades

dentales de la Clínica odontológica de la Universidad José Carlos Mariátegui, al finalizar el turno mañana es bajo (9.09 %), ya que solo se encontró *S. viridans* en una unidad en la zona de jeringa triple a diferencia del turno tarde, con 6 unidades (54.54 %) contaminadas en todas las zonas, ello se debió a la complejidad de tratamientos que presentó el turno tarde y por la falta de desinfección que existe entre pacientes y al finalizar cada turno.

Cavero y Ulloa (2021), en su publicación realizada en la revista multidisciplinar *Ciencia Latina* proponen una investigación para determinar la relación entre el riesgo de contagio de COVID-19 y la gestión de bioseguridad odontológica. Este estudio fue aplicado a una muestra de 110 cirujanos dentistas a través de encuestas y cuestionarios como instrumentos, mediante un enfoque cuantitativo. Se obtuvo como resultado de dicho estudio que un 62,7% de cirujanos afirmaron llevar a cabo una correcta gestión de bioseguridad, esto vinculado a un riesgo del 61,8% de contagio por COVID-19, con lo que se concluyó una estrecha relación entre ambos conceptos y además se pudo evidenciar que el porcentaje de profesionales de la salud dental que aplican en forma adecuada las medidas de bioseguridad es bajo.

Paiva (2019) En tu tesis para adquirir el título profesional de ingeniero mecánico-eléctrico “Sistema de posicionamiento indoor para el guiado de robots móviles implementado en Robot Operating System (ROS).” de la Universidad de Piura. En la cual indico como objetivo el desarrollo una solución alternativa al posicionamiento de robots móviles u objetos específicos en lugares cerrados. La metodología que utilizaron consistió en el desarrollo de un sistema de posicionamiento indoor con el concepto de espacios inteligentes. Para ello, desarrollaron dos sistemas, el primero de detección y seguimiento y el segundo un sistema de conversión de espacios de 2D a 3D. Los cuales permiten obtener la posición de un objeto en el espacio a través de un marcador. La investigación concluyó que es posible desarrollar, con un error aceptable, un sistema capaz de posicionar objetos en el espacio a través de marcadores y rearmar cualquier trayectoria que siga los más exacta posible.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio.

Como parte de esta tesis es conveniente mencionar conocimientos y conceptos que permitan una mayor comprensión de la presente tesis tanto para el lector como para los investigadores. Por lo mencionado se dispone la información que se detalla en los siguientes párrafos.

2.2.3 Disposiciones para una correcta atención en un consultorio dental.

Para fines prácticos de la presente investigación se acotarán las directrices que tengan estrecha relación con la interacción con el paciente dentro del área donde se realizará la intervención médica, así como la manipulación involucrados en dicha atención, donde se deberá tener las siguientes consideraciones:

- El personal de salud deberá contar con el equipo de protección personal, el cual consta de un mandil descartable, gorro descartable, un protector facial o gafas con ventosa, mascarillas reglamentadas y guantes. Asimismo, se debe poseer a disposición de un campo descartable, que es una prenda o manta que se utiliza para proteger al paciente según la recomendación del Ministerio de Salud del Perú - (MINSA 2020).
- El personal involucrado en la atención directa del paciente deberá identificar los implementos que sean de uso único por paciente (descartables), o instrumentos que deban de ser tratados mediante un proceso de desinfección y esterilización, siendo este proceso efectuado por un profesional responsable de esta labor, cualificado y capacitado para la misma con el fin de garantizar la seguridad del uso de estos. Adicionalmente se deberá realizar la limpieza y desinfección de las superficies, siendo requerido la utilización de cobertores tales como bolsas o fundas que cubran las superficies que representen una dificultad en su limpieza, teniendo como ejemplo los dispositivos de control de la silla dental, la lámpara de iluminación y otros equipos de cómputo, considerando que estos cobertores deberán ser retirados entre cada atención medida. (MINSA 2020).

En base a la experiencia se conoce que, si bien existen las recomendaciones mencionadas en líneas anteriores, no todas estas son llevadas a cabo, siendo una de las actividades omitidas el uso de los protectores descartables en las superficies, suponiendo un riesgo.

2.2.4 Enfermedades infecciosas transmisibles durante la atención médica dental

A. Virus del herpes simple:

El virus del herpes, también conocido comúnmente como herpes, es un tipo de infección que se puede ocasionar por el virus del herpes simple tipo 1 (VHS-1) o por el virus del herpes simple tipo 2 (VHS-2). Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020).

- Virus del herpes simple tipo 1 (VHS-1).

El VHS tipo 1, suele ser muy infecciosa y endémica a nivel mundial. Se transmite comúnmente por contacto de boca a boca causando lesiones en la boca o alrededor de ella (herpes labial). La mayoría de las personas infectadas por este virus, no suelen presentar síntomas, hasta que este se manifiesta en úlceras o llagas, causándoles una sensación de hormigueo o quemazón en la zona infectada (OMS, 2020).

- Virus del herpes simple tipo 2 (VHS-2).

El VHS tipo 2, al igual que el VHS tipo 1, es contagioso y frecuente en todo el mundo. La diferencia es que este tipo de virus es transmitido principalmente por vía sexual, provocando infecciones alrededor o en la parte genital o anal (herpes genital). Las personas no suelen manifestar ningún tipo de síntoma o si los tienen, llegan a ser tan leves, que se pasa por alto. Este tipo 2 se caracteriza porque en la zona infectada se presentan una o más vesículas o úlceras genitales o anales, provocando una sensación de hormigueo o dolor intenso en las piernas, caderas y las nalgas (OMS, 2020)

- Virus varicela-zoster (VZV).

El virus varicela zóster es de tipo neurotrópico, infectan exclusivamente a los humanos. La infección primaria va a causar la varicela (altamente contagiosa), después de presentar el cuadro, el virus permanece inactivo en el sistema nervioso central. Una alteración en el sistema inmune podría favorecer a la reactivación del virus, condicionando la aparición del herpes zoster, este se va a manifestar por vesículas extremadamente dolorosas en dermatomas específicos del cuerpo. (Cravioto, Galván, Guarneros, Pastor y Vázquez 2017)

B. Virus de la inmunodeficiencia humana (VIH):

Es un virus que compromete el sistema inmunológico, afectando las defensas del organismo ante otras infecciones convirtiéndolas en oportunistas, provocando múltiples procesos patológicos que el sistema inmunitario no puede combatir. Cuando que el virus ingresa al organismo destruye las células de defensa (linfocitos) inhibiendo el funcionamiento adecuado de la inmunidad, condicionando a un cuadro de inmunodeficiencia susceptible a diversas enfermedades que al no ser tratadas adecuadamente pueden provocar la muerte. Usualmente no suele manifestarse hasta estar en una fase avanzada, presentando síntomas comunes de gripe, cefalea, erupciones en el cuerpo o dolor de garganta. Su transmisión es a través del intercambio de líquidos corporales: sangre, semen, secreciones vaginales o leche materna con la persona infectada (OMS, 2021).

C. Hepatitis

Es una enfermedad viral que causa un proceso inflamatorio a nivel hepático, produciendo diversas patologías agudas y crónicas. (OMS, 2020).

- Virus de la Hepatitis B.

Es una infección hepática que puede ser aguda o crónica (MedlinePlus, 2021). Esta transmisión es de tipo vertical, es decir, de madre a hijo durante el periodo de la gestación, también a través de transfusiones, perforaciones, tatuajes, inyecciones (aguja contaminada), exposición a sangre, líquidos corporales infectados (saliva, semen y flujo vaginal) y por relaciones sexuales. Una vez la persona está infectada, no presenta síntomas de manera inmediata, conforme pasa el tiempo, irán manifestando un cuadro agudo que durarán varias semanas como: color amarillento de la piel y ojos (ictericia), el color de la orina se torna oscura (coluria), sensación de cansancio extremo, náuseas, vómitos y dolor a nivel abdominal (OMS, 2020).

- Virus de la Hepatitis C.

Al igual que el virus de la hepatitis B, es un proceso inflamatorio que afecta al hígado, presentándose en estadio agudo y crónico. La hepatitis C aguda, es una infección de corta duración pudiendo presentar síntomas que duran aproximadamente 6 meses. El desarrollo de la enfermedad depende del estado inmunológico del organismo comprometido, pudiendo auto limitándose o evolucionando a estadio crónico. La hepatitis C crónica, se relaciona con la causa más frecuente de cirrosis (cicatrización del hígado), cáncer de hígado e incluso puede llevar a la muerte (MedlinePlus, 2021).

Este virus se transmite vía sanguínea, las más frecuentes son: inadecuada esterilización del material médico (jeringas o agujas), transfusión de sangre contaminada y la reutilización de inyectables. Los síntomas suelen ser agudos, incluyendo fiebre, inapetencia, náuseas, dolor abdominal, coluria, acolia, dolor en las articulaciones e ictericia. (OMS, 2021).

- Virus de la Hepatitis D.

Proceso inflamatorio que igualmente afecta al hígado, a diferencia de las hepatitis B y C, necesita la presencia del virus de la hepatitis B para poder hacer su replicación. La unión de ambos virus es considerada la más grave de hepatitis vírica crónica, debido a que su infección viral es más rápida que los demás tipos de virus de hepatitis. Esta coinfección provocará carcinoma hepatocelular y la muerte por causas hepáticas. Su transmisión es similar a la del virus de la hepatitis B, mediante el contacto percutáneo con sangre o productos médicos/sanguíneos infectados. (OMS, 2021).

2.2.5 Brazo robótico

A. Estructura Mecánica del robot

La estructura mecánica de un robot está conformada por un grupo de eslabones, los cuales se unen por medio de articulaciones que posibilitan el movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. Las formas que poseen la mayor parte de los brazos robóticos son muy similares al brazo de una persona, es decir, que poseen ciertas características antropomórficas, debido a ello hay elementos del brazo robótico que tiene los mismos términos como muñeca, codo, brazo, cuerpo. (Jabonero, 2010)

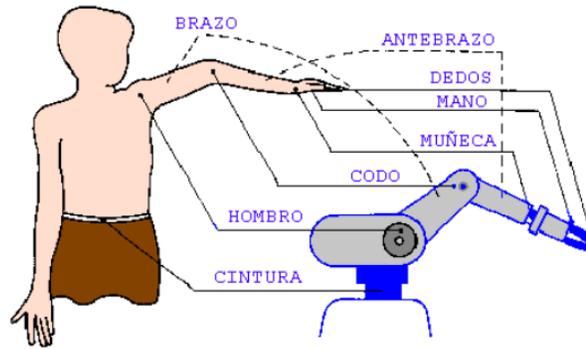


Figura N 4: Estructura de un brazo robótico

Fuente: Jabonero (2010).

Los movimientos de cada articulación pueden ser de giro, desplazamiento o de una combinación de ambos. Existen seis tipos diferentes de articulaciones las cuales se muestran en la figura 5, si bien existen seis distintos tipos de articulaciones, en la práctica solo se usan la articulación prismática y la de rotación. (Aracil, Balaguer, Barrientos y Peñín 2007).

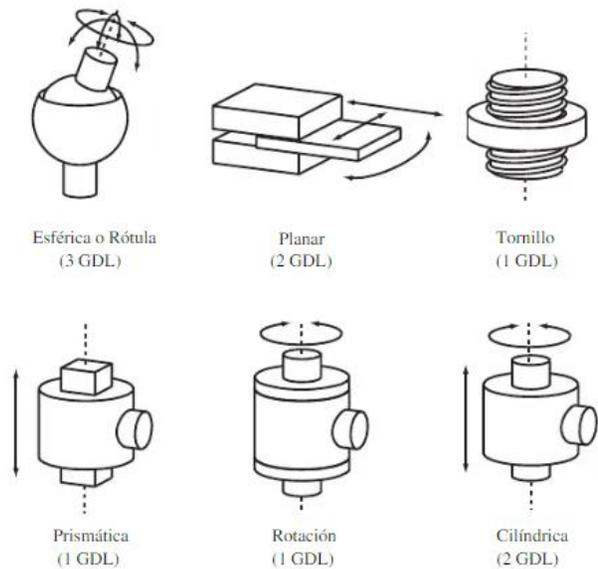


Figura N 5: Tipos de articulaciones

Fuente: Jabonero (2010)

Se le denomina grado de libertad (GDL) a cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior. En la figura 5 muestra el número de GDL de los seis tipos de

articulaciones. El número de grados de libertad de un robot se determina mediante la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo conforman. (Arcil, 2007)

El uso de diversas combinaciones de articulaciones en un robot, da como resultado diferentes configuraciones, con características las cuales se deben tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más utilizadas son las que se muestran en la figura 6 donde solamente se atiende a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más esenciales al momento de posicionar su extremo en un punto del espacio. (Arcil, 2007)

Debido a que para orientar y posicionar un cuerpo de cualquier manera en el espacio es necesario seis parámetros, tres para la orientación y tres para definir la posición, para que un robot oriente y posicione su extremo de cualquier forma en el espacio, se precisarán al menos seis GDL. (Arcil, 2007)

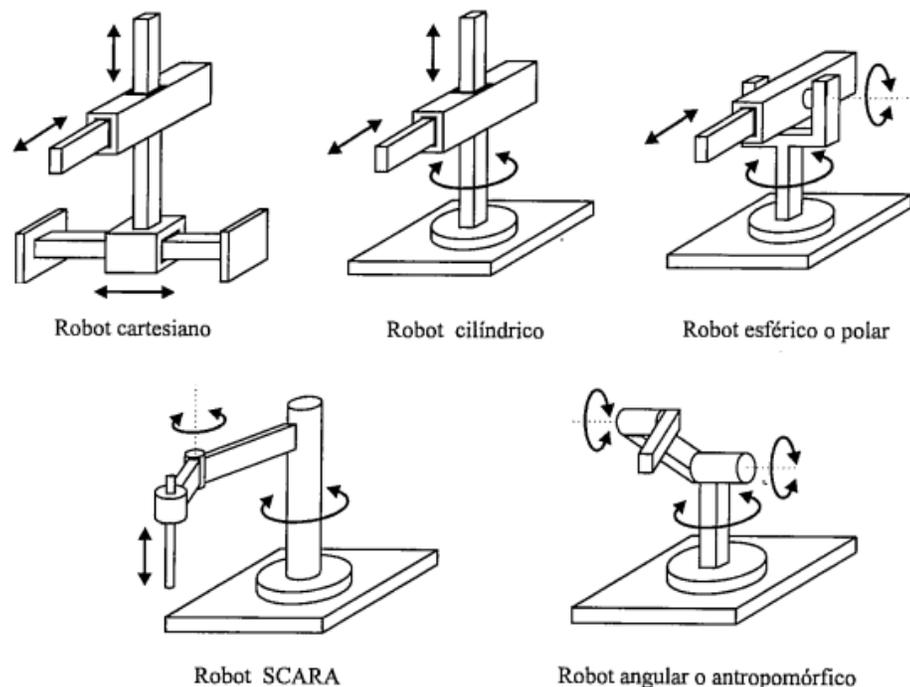
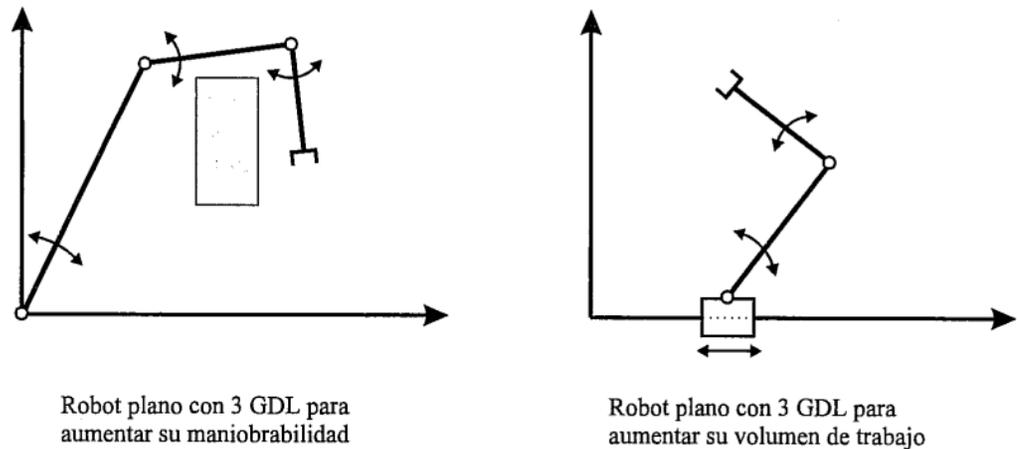


Figura N 6: Configuración más frecuente en robots industriales

Fuente: Arcil (2007)

Si bien es necesario seis grados de libertad para lograr una libertad total en la orientación y posicionamiento de la herramienta del robot, en la práctica, hay una gran cantidad de robots industriales que solo cuentan con cuatro o cinco GDL, ya que estos son suficientes para realizar las tareas que se les asigna. (Arcil, 2007)

También existen casos contrarios, donde el robot para que pueda acceder a todos los puntos de su entorno, se le adiciona más de seis GDL. De este



modo, si se trabaja en un entorno con una mayor cantidad de obstáculos, es beneficioso adicionar al robot de GDL extra, las cuales permitirán al robot ser capaz de tener una orientación y posición adecuada, las cuales no hubieran sido posible con solo seis GDL. Una situación que es bien recurrente es adicionar al robot un GDL extra que le facilite moverse en todo un carril, incrementando el volumen del espacio donde va trabajar. Cuando hay una mayor cantidad de grados de libertad de las que necesita el robot para hacer una acción específica, se conoce como un robot redundante. (Arcil, 2007)

Figura N 7: Robots planares redundantes

Fuente: Arcil (2007)

En la figura 7 muestra dos situaciones que se comentaron anteriormente, robots planares que solo les sería suficiente poseer 2 GDL para ubicar su

herramienta o extremo en cualquier parte de su área de trabajo. (Arcil, 2007)

B. Transmisiones y reductores

Las transmisiones son elementos los cuales se encargan de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. En el caso de los reductores, su función es la de acondicionar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores necesarios para el correcto movimiento del robot. (Arcil, 2007)

C. Transmisiones

Dado que el robot mueve su extremo con una aceleración elevada, es muy importante reducir su momento de inercia lo máximo posible. De la misma manera, los pares estáticos que los actuadores deben vencer dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Debido a esto se estima que los actuadores, que por lo general son pesados, estén ubicados lo más cerca posible a la base del robot. Debido a esta circunstancia se debe utilizar, de manera obligatoria, sistemas de transmisión que transfieran el desplazamiento hasta las articulaciones, en especial a las que se encuentran al extremo del robot. De la misma manera, se pueden utilizar las transmisiones para transformar movimientos circulares en lineales o viceversa. (Arcil, 2007)

Tabla N° 2

Sistemas de transmisión para robots

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformidad
Circular-Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal-Circular	Paral. articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Fuente: Arcil (2007)

Un buen sistema de transmisión debe cumplir una serie de características básicas. En primer lugar, el sistema de transmisión debe ser de un tamaño y peso reducido. Segundo, se debe evitar que presente juegos u holguras considerables. Por último, las transmisiones deben ser de gran rendimiento. (Arcil, 2007)

Si bien no existen un sistema de transmisión específico para robots, si existe algunos que son usados frecuentemente, los cuales están indicados en la Tabla 3. Los sistemas de transmisión están clasificados en función al tipo de movimiento en la entrada y salida: circular o lineal. La tabla también muestra las ventajas e inconvenientes de cada uno de los sistemas de transmisión. Una de las más destacadas es la holgura o juego. Es de suma importancia que el sistema de transmisión que se va usar no influya al movimiento que trasmite, ya sea por el rozamiento propio de su funcionamiento o por las holguras que su desgaste puede generar. Otro

punto importante a tener en cuenta es que el sistema de transmisión debe tener la capacidad de tolerar un continuo funcionamiento con un par elevado, y de ser posible entre grandes distancias (Arcil 2007).

D. Reductores

En el caso de los reductores, existen sistemas que son usados de forma específica. Esto se da debido a que existe una exigencia a los reductores utilizados en la robótica, las cuales son muy restrictivas. Estas exigencias que se les pide a los reductores vienen motivadas por las altas prestaciones que se requieren del robot en cuanto a la precisión y velocidad de posicionamiento. En la Tabla 3 indica los valores típicos de los reductores para la robótica. (Arcil, 2007)

Por lo general lo que se busca en un reductor es que tengan un peso mínimo, un tamaño reducido, bajo rozamiento y a la vez sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. También se tiende a reducir el momento de inercia, de negativa influencia en el funcionamiento del motor. (Arcil, 2007)

Por motivos de diseño, el reductor posee una velocidad máxima de entrada admisible, la cual esta aumentará a medida que el tamaño del motor disminuya. También hay una limitación en el par de salida nominal permisible (T_2) el cual está supeditado al par de entrada (T_1) y de la relación de transmisión a través de la relación: (Arcil, 2007)

$$T_2 = \eta T_1 \frac{W_1}{W_2} \quad (01)$$

Donde (η) es el rendimiento que puede llegar a ser cerca del 100% y la relación de reducción de velocidades (W_1 = velocidad de entrada; W_2 = velocidad de salida) la cual puede variar entre 50 y 300. (Arcil, 2007)

Tabla N° 3

Características de reductores para robótica

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50 ÷ 300
Peso y tamaño	0.1 ÷ 30 kg
Momento de inercia	10 ⁻⁴ kg m ²
Velocidad de entrada máxima	6000 ÷ 7000 rpm
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 ÷ 2 “
Rigidez torsional	100 ÷ 2000 Nm/rad
Rendimiento	85 % ÷ 98 %

Fuente: Arcil (2007)

Ya que el trabajo que realizan los robots se hace en ciclos cortos, lo que conlleva a arranques y paradas continuas, es muy importante que el reductor soporte pares elevados puntuales. El juego angular también debe ser lo menor posible. Éste se puede definir como el ángulo que gira el eje de salida al momento que se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar el eje de entrada. Por último, es necesario que estos tengan una alta rigidez torsional, la cual se define como el par que se tiene que aplicar sobre el eje de salida para que, manteniendo bloqueado el de entrada, este gire un ángulo unitario. (Arcil, 2007)

Los reductores que comúnmente son más usados, pertenecen a las empresas Harmonic Drive y Cyclo-Getriebebau. Los primeros, que se denominan HDUC figura 8, se basan en una corona exterior rígida figura 9 que posee un dentado interno (*circular spline*) y un vaso flexible (*flexspline*) con un dentado exterior que engranan en el primero. En ambos, el número de dientes que tienen difiere en 1 o 2. En el interior del vaso gira un rodamiento con forma elíptica (*wave generator*) que deforma el vaso, esto hace que se ponga en contacto la corona exterior con la zona del vaso

correspondiente al diámetro máximo de la elipse. Cuando gira el *wave generator* (en el cual se fija el eje de entrada), los dientes del *flexspline* (que se encuentra fijado al eje de salida) son obligados a que engranen uno a uno con los del *circular spline*, debido a que hay una diferencia de dientes $Z = N_c - N_f$, después de una vuelta completa del *wave generator*, el *flexspline* habrá avanzado solamente Z dientes. Por lo tanto, la relación de reducción obtenida será Z/N_f . Concretamente, se logran reducciones de hasta 320, con una holgura próxima a cero y una capacidad de transmisión de par de 5720 Nm. (Arcil, 2007)

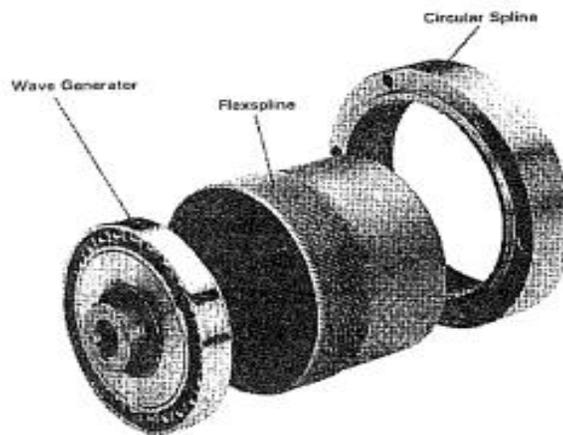


Figura N 8: Despiece Reductor Armónico

Fuente: Arcil (2007)

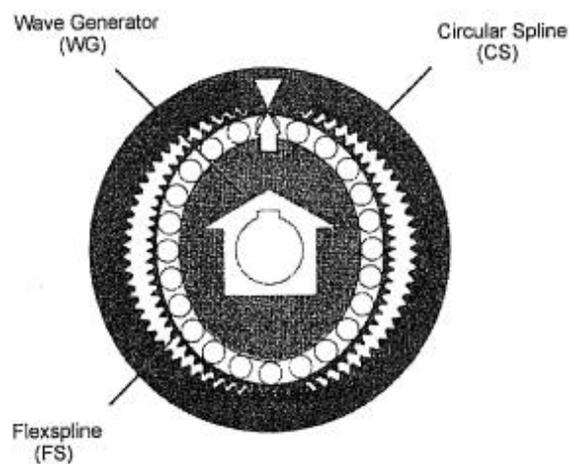


Figura N 9: Esquema Reductor Armónico

Fuente: Arcil (2007)

En el caso de los reductores CYCLO, este consiste en el movimiento de un disco de curvas de forma cicloidal figura 10, el cual es movido por una excéntrica solidaria al árbol de entrada. Cada vez que se genere un giro de la excéntrica, el disco de curvas avanza un saliente rodando encima de los rodillos exteriores. Al generarse este avance también se mueven los pernos del árbol de salida, los cuales van a describir un cicloide dentro de los huecos del disco de curvas. El componente de traslación angular que se genera en este movimiento se corresponde con la rotación del árbol de salida. Por consiguiente, el número de salientes determina la relación de reducción. Por lo general en estos sistemas se utilizan dos discos desfasados entre sí 180° para poder resarcir los momentos de flexión y de las masas de cada disco en movimiento excéntrico. (Arcil, 2007)

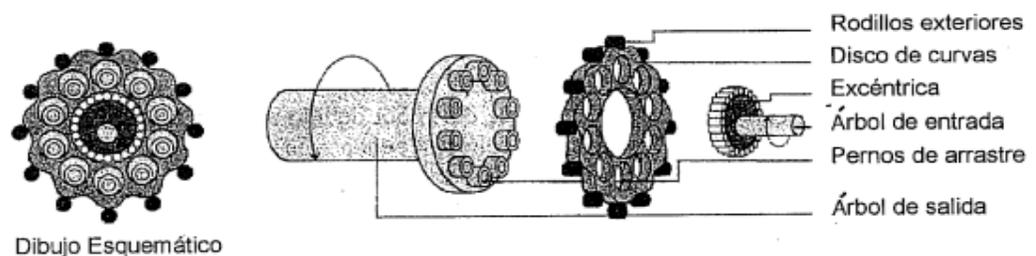


Figura N 10: Reducto Cyclo.

Fuente: Arcil (2007)

E. Accionamiento directo

Existen robots que poseen accionamiento directo (*Direct Drive DD*) en el cual, el eje del actuador está conectado a la carga o articulación de forma directa sin utilizar un reductor interno. Este término se suele usar de forma exclusiva para robots con accionamiento eléctrico. (Arcil, 2007)

Existía una necesidad de emplear robots en situaciones en las que se requerían unir precisión con velocidad. Los reductores pueden generar ciertos efectos negativos en el robot, por ejemplo, el juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionador, los cuales no

permiten llegar a los valores de precisión y velocidad que se necesita. (Arcil, 2007)

Las ventajas principales que se dan al utilizar accionamientos directos son las siguientes: (Arcil, 2007)

- Una mayor rapidez y precisión al momento de posicionarse, ya que se evitan los rozamientos y juegos de las transmisiones y reductores.
- Aumento en la posibilidad de tener un mayor control del sistema a costa de un incremento en la complejidad.
- Un sistema mecánico simple al eliminar el reductor.

El problema principal para utilizar de forma práctica un accionamiento directo radica en el motor a emplear. El motor debe generar un par elevado (50-100 veces mayor que con reductor) a revoluciones bajas (las de movimiento de la articulación) conservando la máxima rigidez posible. (Arcil, 2007)

Los motores que se usan para accionamiento directo y que tengan estas cualidades, son los motores síncronos y de continua sin escobilla (*brushless*), estos dos motores poseen imanes permanentes hechos con samario-cobalto. Los motores de inducción de reluctancia variable también son usados. El problema al utilizar este tipo de motores sé que encarece considerablemente el sistema de accionamiento. (Arcil, 2007)

Otras de las consideraciones que se debe tener en cuenta para el uso de accionamientos directos es la propia cinemática del robot. Ubicar motores, por lo general pesados y voluminosos, junto a las articulaciones, no es viable para las configuraciones del robot debido a las inercias que llegan a generar. El estudio de la cinemática con la que se diseña el robot deberá tener en cuenta estos parámetros, los cuales condicionarán al momento de elegir la estructura final. Por esta razón, generalmente los robots de accionamiento directo son de tipo SCARA, del cual su diseño se corresponde bien con las necesidades que el accionamiento directo implica. Al retirar el reductor también disminuye considerablemente la

resolución real del codificador de posición acoplado al eje. Esto genera la utilización de codificadores de posición de resolución muy alta en los DD. (Arcil, 2007)

F. Actuadores

Los actuadores tienen la función de generar los desplazamientos de cada parte del robot, estos movimientos son dirigidos por la unidad de control. La energía que pueden emplear los actuadores son la energía neumática, hidráulica o eléctrica. Estos sistemas poseen diferentes cualidades, las cuales, se deben evaluar al momento de elegir el tipo de actuador. Las cualidades más resaltantes son: (Arcil, 2007)

- Potencia.
- Controlabilidad.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Coste

G. Actuadores neumáticos

La energía en este tipo de actuador es el aire a presión entre 5 y 10 bar. Se tiene dos tipos de actuadores neumáticos: (Arcil, 2007)

- Cilindros neumáticos.
- Motores neumáticos (de aletas rotativas o de pistones axiales).

En los cilindros neumáticos el desplazamiento del émbolo se consigue gracias a la diferencia de presión que se genera en este, figura 11. Este tipo de sistema puede ser de simple o doble efecto. En los de simple efecto, el émbolo se desplaza en un sentido como consecuencia del empuje ocasionado por el aire a presión y este retornara a su posición de reposo debido al efecto del muelle. (Arcil, 2007)

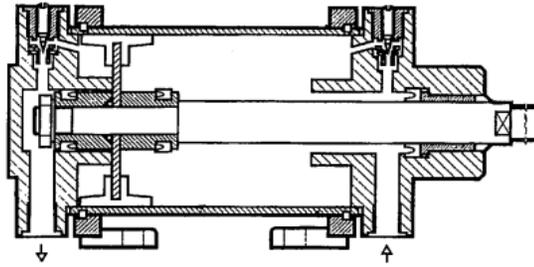


Figura N 11: Esquema de cilindro neumático de doble efecto

Fuente: Arcil (2007)

En el caso de los cilindros de doble efecto el aire a presión se encarga de desplazar el émbolo en las dos direcciones, ya que este puede ser introducido de manera aleatoria en cualquiera de las dos cámaras. (Arcil, 2007)

Generalmente, el posicionamiento de los cilindros neumáticos es solo en los extremos del mismo y no es capaz de tener un posicionamiento continuo por sí solo. Esto último se puede lograr con la ayuda de una válvula de distribución (normalmente de accionamiento eléctrico) que concentra todo el aire a presión en cualquiera de las caras del émbolo. También existen sistemas de posicionamiento continuo de accionamiento neumático, pero debido a su precio y calidad todavía no resultan competitivos. (Arcil, 2007)

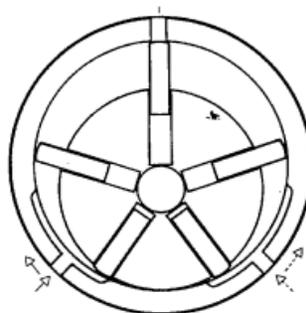


Figura N 12: Motor de paletas

Fuente: Arcil (2007)

Con respecto a los motores neumáticos, el movimiento de rotación de un eje también se logra mediante aire a presión. Los tipos más usados son dos, los motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales. En los motores de aletas rotativas (figura 12) en el rotor excéntrico están dispuestas las aletas de longitud variable. Al momento que ingresa el aire a presión en cualquiera de los compartimentos generados por dos aletas y la carcasa, estas están propensas a girar de tal forma que el compartimiento posea un volumen mayor. En el caso de los motores de pistones axiales, estos poseen un eje de giro unido a un tambor el cual está obligado a girar por las fuerzas que realizan varios cilindros, los cuales están sobre un plano inclinado (figura 13). (Arcil, 2007)

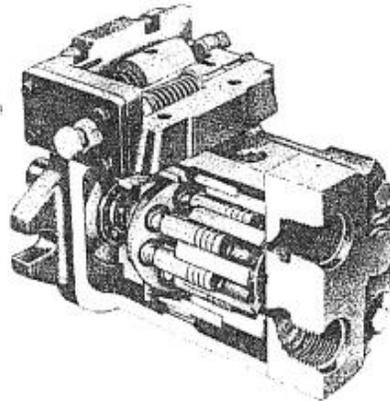


Figura N 13: Motor de pistones axiales

Fuente: Arcil (2007)

Existe otro modo conocido y menos complicado para generar movimientos de rotación a partir de actuadores neumáticos, este consiste en el uso de cilindros, en los cuales su émbolo se encuentra unido a un sistema de piñón-cremallera. El sistema forma una unidad compacta la cual es fácil de adquirir en un mercado. (figura 14). (Arcil, 2007)

En general y gracias a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no logran una precisión de posicionamiento buena. No obstante, su sencillez y robustez lo hacen idóneo en cosas en las que solo sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones distintas. Por ejemplo, se usan en apertura o cierre de pinzas, en manipuladores sencillos

o en ciertas articulaciones de algún como puede ser el robot SCARA. (Arcil 2007).

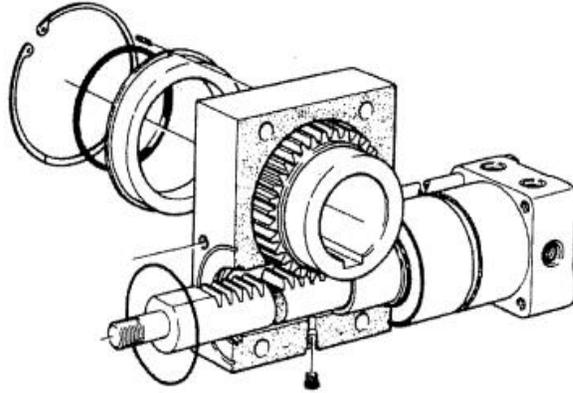


Figura N 14: Actuador rotativo de tipo piñón-cremallera
Fuente: Arcil (2007)

Se debe tener en cuenta que, para el uso de un robot con algún tipo de accionamiento neumático se tiene que disponer de una instalación de aire comprimido, incluyendo: compresor, filtros, sistemas de distribución (electroválvulas, tuberías), secadores, etc. Sin embargo, existen varias fábricas que pueden hacer estas instalaciones y con cierto grado de automatización. (Arcil, 2007)

H. Actuadores hidráulicos

Funcionalmente este tipo de actuadores no se diferencia mucho de los neumáticos. En estos actuadores, en lugar de usar aire se utiliza aceites minerales, el cual se encuentra a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, pero en algunos casos puede llegar a superar los 300 bar. En este tipo de actuadores también existen, como también es en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones. (Arcil, 2007)

Sin embargo, los fluidos que se usan en los actuadores hidráulicos poseen ciertas características que marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, los aceites usados poseen un grado de compresibilidad el cual

es inferior al del aire, por esta razón la precisión obtenida es mayor en este caso. Además, en ellos es menos complicado realizar un control continuo, que permite posicionar su eje en todo un rango de valores (usando servocontrol). Asimismo, las presiones de trabajo son tan elevadas, diez veces mayor a los neumáticos, que permiten generar grandes fuerzas y pares. (Arcil, 2007)

Por otra parte, estos actuadores tienen una gran estabilidad frente a cargas estáticas. Esto quiere decir que el actuador puede soportar cargas, como puede ser el peso o una presión ejercida en una superficie, sin necesidad de aporte de energía. Destaca también su gran capacidad de carga y relación potencia-peso, como también sus características de autolubricación y robustez. (Arcil, 2007)

Si bien este tipo de actuador posee una cantidad considerable de cualidades, también tienen ciertas desventajas. Una de ellas es la fuga de aceite a lo largo de la instalación, esta se genera por las altas presiones a las que trabaja. Asimismo, esta instalación es más compleja que la necesaria para los actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos. (Arcil, 2007)

I. Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos son los que más se usan al momento de diseñar robots industriales actualmente, esto se debe a sus características de control, sencillez y precisión. Dentro de estos actuadores, se tiene tres tipos distintos los cuales son: (Arcil, 2007)

- Motores de corriente continua (DC):
 - Controlados por inducido.
 - Controlados por excitación.
- Motores de corriente alterna (AC):
 - Síncronos.
 - Asíncronos.
- Motores paso a paso.

Motores de Corriente Continua (DC):

Este tipo de motor fue usado por un largo tiempo, gracias a su facilidad de control. En la figura 15 muestra el esquema de un motor DC. La alta necesidad de mantenimiento, generada por el uso de escobillas, y las limitaciones de par, debido al riesgo de un sobrecalentamiento, han provocado que sean sustituidos paulatinamente por motores sin escobillas o motores de alterna. (Arcil, 2007) Los motores de corriente continua están conformados por dos devanados internos, inducido e inductor, los cuales son alimentados por corriente continua:

- El inductor, el cual también se le denomina devanado de excitación, se encuentra ubicado en el estator y genera un campo magnético de dirección fija, denominado de excitación.
- El inducido, ubicado en el rotor, hace girar al mismo gracias a la fuerza de Lorentz, la cual aparece debido a la combinación de la corriente que circula por él y del campo magnético de excitación. La corriente se recibe a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito.

Se puede sustituir el devanado inductor por imanes, que generan un campo magnético constante (como el motor esquematizado que se muestra en la figura 15) equivalente al que genera un devanado inductor.

Para que se pueda generar la energía mecánica a partir de la eléctrica de forma continua, es importante que los campos magnéticos del rotor y estator se mantengan estáticos entre sí. Esta conversión de energía es máxima cuando los campos se encuentran en cuadratura. El colector de delgas, que es un tipo de conmutador, este sincronizado con el rotor, este se encarga de mantener el ángulo relativo entre el campo generado por las corrientes retóricas del rotor y el campo inductor del estator. De esta manera, la corriente continua que alimenta al motor se puede transformar automáticamente, en función de la velocidad de la máquina, en corriente alterna de frecuencia variable en el

inducido. Se le conoce a este tipo de funcionamiento con el nombre de autopilotado. (Arcil, 2007)

Se puede regular la velocidad del motor modificando la tensión de alimentación de inducido o variando la tensión del inductor. Cuando aumenta la tensión del inducido la velocidad de la máquina también aumenta. Si se alimenta al motor con una tensión constante, es posible variar la velocidad variando el flujo de excitación. Pero al disminuir el flujo también disminuirá el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante. (Arcil, 2007)



Figura N 15: Motor de corriente continua

Fuente: Arcil (2007)

En el control por inducido, la intensidad se mantiene constante en el inductor; mientras que, en el inducido la tensión se usa para controlar la velocidad de giro. En el caso de los controlados por excitación sucede al contrario. (Arcil, 2007)

A partir del estudio de ambos tipos de motores y realizando las simplificaciones correspondientes, se logra obtener la relación entre tensión de control y velocidad de giro (función de transferencia). En los controladores por inducción la función de transferencia responde a un sistema de primer orden, mientras en los motores controlados por excitación, la relación es una de segundo grado (figura 16). (Arcil, 2007)

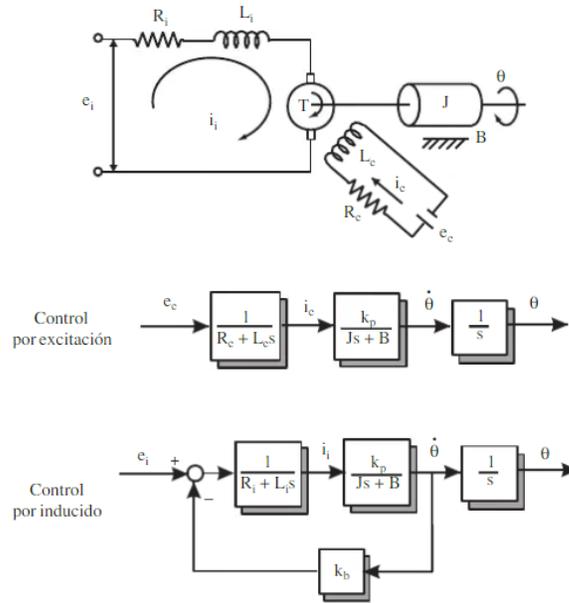


Figura N 16: Motor DC – Esquema y funciones de transferencia

Fuente: Arcil (2007)

Además, en los motores que se controlan por inducción se origina un efecto que estabiliza la velocidad de giro, generado por la realimentación intrínseca que posee a través de la fuerza contraelectromotriz. Debido a estos motivos, el motor DC controlado por inducción es el que se usa para el accionamiento de robots. (Arcil, 2007)

Motores paso a paso:

Estos tipos de motores, por lo general, no son considerados en los accionamientos industriales, esto se debe esencialmente a que los pares que ofrecían son muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas eran grandes. Estas características limitaban su uso a controles de posición simples. No obstante, años después, estos motores han mejorado sus características técnicas notablemente, Especialmente en lo relativo a su control, este cambio permitió fabricar motores paso a paso con la capacidad de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos, para utilizarlos como accionamiento industrial. (Arcil, 2007)

Los tipos de motores paso a paso que existen son tres:

- De imanes permanentes.
- De reluctancia variable.
- Híbridos.

En los motores paso a paso de imanes permanentes (figura 17), el rotor, el cual tiene una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos en función al campo magnético generado por las fases del estator. En el caso de los motores de reluctancia variable, el rotor está hecho de un material ferromagnético, el cual tiende a orientarse de tal modo que facilita el camino de las líneas de fuerza del campo magnético creado por las bobinas de estator. Por último, el funcionamiento de los motores híbridos es una combinación de los dos tipos anteriores. (Arcil, 2007)

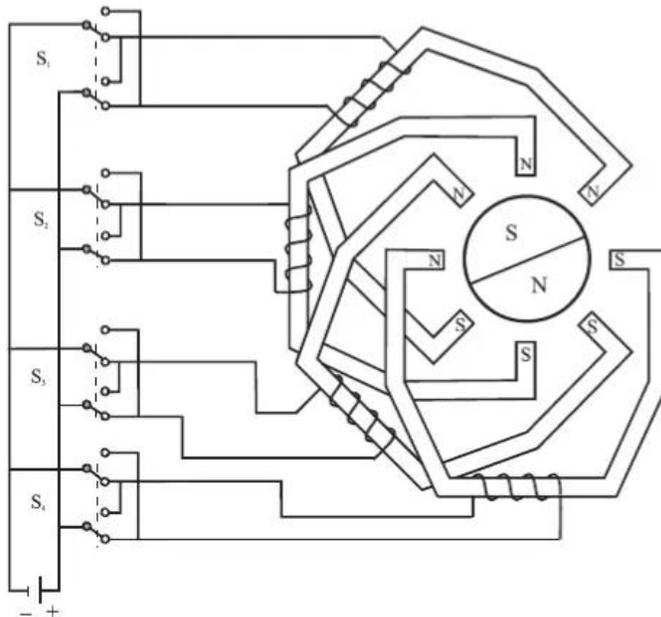


Figura N 17: Esquema de motor paso a paso de imanes permanentes con cuatro fases
Fuente: Arcil (2007)

La señal de control, en los motores paso a paso, son trenes de pulso que van actuando de forma rotativa sobre una serie de electroimanes ubicados en el estator. Cada vez que se reciba un pulso, girará el rotor del motor un determinado número discreto de grados. (Arcil, 2007)

Obtener el giro del rotor en un número de grados exacto, se debe excitar las bobinas del estator de forma secuencial a una frecuencia que determine la velocidad de giro. Las propias inercias de parada y arranque no permiten que el rotor llegue a la velocidad nominal de forma instantánea, por ende, esta y la frecuencia de pulsos que la fija, tienen que ser incrementadas paulatinamente. (Arcil, 2007)

Existen circuitos especializados que ayudan a simplificar el control de estos motores. Estos circuitos generan a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación reparte a cada fase. (Arcil, 2007)

Motores de Corriente Alterna (AC):

Estos motores no eran usados en la robótica debido a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se hicieron en las máquinas síncronas hacen que se usen de manera más frecuente en los robots industriales. Esto se da gracias a tres factores:

- Fabricación de rotores síncronos sin escobillas.
- Empleo de convertidores estáticos que permiten cambiar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- Uso de la microelectrónica que proporciona una gran capacidad de control.

El inductor se ubica en el rotor y está compuesto por imanes permanentes y en el caso del inductor, ubicado en el estator, está constituido por tres devanados iguales decalados 120° eléctricos que son alimentados por un sistema trifásico de tensiones. (Arcil, 2007)

La velocidad de giro en los motores síncronos depende solamente de la frecuencia de la tensión que se suministra al inducido. Para lograr variar ésta con exactitud, el control de velocidad se hace a través de un convertidor de frecuencias. Para prevenir la pérdida de sincronismo se usa un sensor de posición que identifica la posición del rotor y permite conservar en todo

momento el ángulo que forman los campos del estator y del rotor. Este método de control es conocido como autosíncrono o autopilotado. (Arcil, 2007)



Figura N 18: Motores sin escobillas con su etapa de control y potencia

Fuente: Arcil (2007)

El motor síncrono autopilotado excitado con imán permanente, también denominado motor senoidal, no muestra problemas de mantenimiento ya que no tiene escobillas y tiene una gran capacidad de expulsión de calor, debido a que los devanados se encuentran en contacto directo con la carcasa. Se puede realizar el control de posición de velocidad sin necesidad de utilizar un sensor externo adicional, utilizando el detector de posición del rotor que tiene el propio motor. Además, permite generar una potencia mayor a la que generarán un motor de corriente continua. (Arcil, 2007)

Tabla N° 4

Características de distintos tipos de actuadores para robots

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5 – 10 bar)	Aceite mineral (50 – 10 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor de pistones axiales	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación de potencia-peso Autolubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiables Fácil control Sencilla instalación Silenciosos
Desventajas	Dificultad control continuo Instalación especial Ruidoso	de Difícil mantenimiento Instalación especial Frecuentes fugas Caros	Potencia limitada

Fuente: Arcil (2007)

J. Sensores internos

Para que un robot logre realizar su actividad sin errores, con velocidad e inteligencia, será de suma importancia que este posea conocimiento de su estado interno como externo. Para obtener datos de su estado (principalmente de la ubicación de sus articulaciones), se necesitan los denominados sensores internos y para el estado de su entorno, se requiere de los sensores externos. (Arcil, 2007)

La información que puede adquirir la unidad de control de robot acerca del estado de su estructura mecánica es, principalmente, la relativa a su velocidad y posición. En la tabla 5 indica, de manera resumida, los sensores

que son comúnmente más usados para obtener información de posición, presencia y velocidad en robots industriales. (Arcil, 2007)

Tabla N° 5

Tipos de sensores propioceptivos para robots

Medida	Tipo
Presencia	Inductivo
	Capacitivo
	Efecto hall
	Célula Reed
	Óptico
	Ultrasonido
	Contacto
Posición (Analógicos)	Potenciómetros
	Resolver
	Sincro
	Inductosyn
Posición (Digitales)	LVDT
	Digitales
	Encoders absolutos
	Encoders incrementales
Velocidad	Regla óptica
	Tacogeneratriz

Fuente: Arcil (2007)

K. Sensores de Posición

Para el control de posición angular se usan, principalmente, los encoders y resolvers. En el caso de los potenciómetros, estos sensores no son empleados debido a que dan bajas prestaciones, únicamente se usan para robots educacionales. (Arcil, 2007)

Codificadores angulares de posición (encoders)

Los encoders incrementales están compuestos, en su forma más simple, por un disco transparente, el cual posee una serie de marcas opacas ubicadas

radialmente y equidistantes entre sí; de un sistema de iluminación donde la luz es colimada de manera adecuada, y un fotorreceptor, como se puede observar en la figura 19. El eje, del cual se quiere medir su posición, se encuentra unido al disco transparente. Gracias a esta disposición, cada vez que el eje gire se irá generando pulsos en el receptor provocados por la luz que atraviesa cada marca. Teniendo la cuenta de estos pulsos es factible tener conocimiento de la posición del eje. (Arcil, 2007)

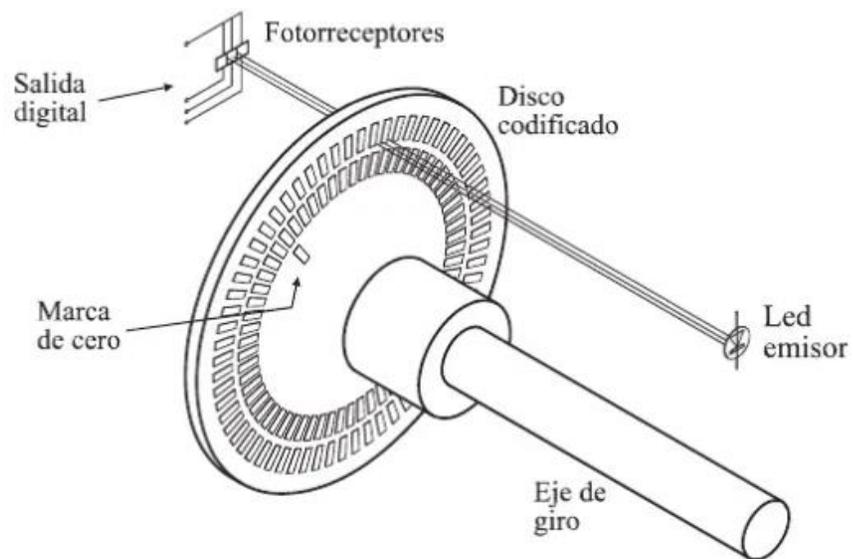


Figura N 19: Disposición de un codificador óptico (encoder incremental)

Fuente: Arcil (2007)

La información del sentido del eje no se obtiene directamente con los pulsos generados por el giro del eje. Para obtener la información se tiene una segunda franja de marcas, desplazada de la anterior de tal forma que el tren de pulsos que se genere, se desfase 90° con relación al que se generó por la primera franja. De este modo, usando un biestable de tipo D (figura 20), en el cual la salida conserva el valor de la entrada leída mientras el flanco positivo del reloj, es factible obtener una señal adicional (Q) que indique su sentido de giro, y que actúe sobre el contador correspondiente mostrando que decrementa o incrementa la cuneta que esté realizando. (Arcil, 2007)

Ya que el contador es incremental, es necesario establecer cuál es el cero, debido a esto, se incorpora en el disco una única marca de referencia adicional (C), que indica que se dio una vuelta completa y que, por tanto, se tiene que reinicializar el contador. (Arcil, 2007)

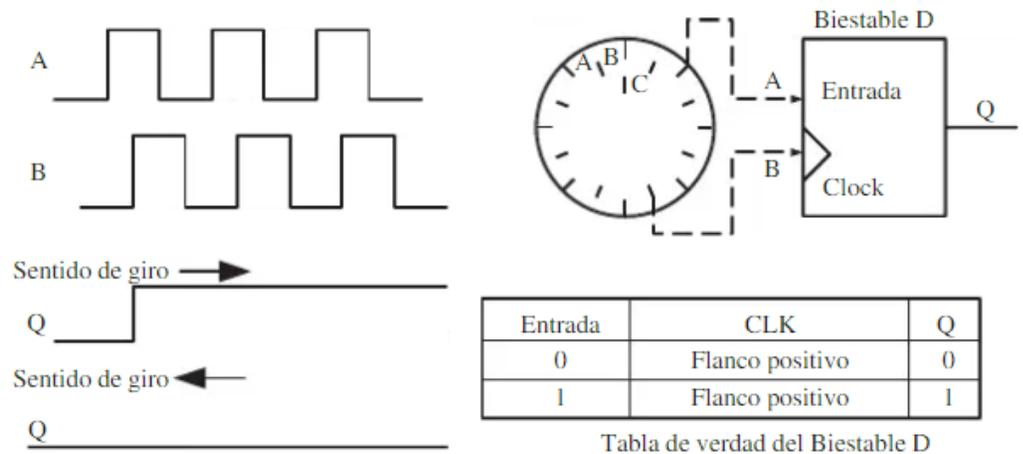


Figura N 20: Salida A y B de un encoder y valor Q del biestable D

Fuente: Arcil (2007)

En estos sensores, su resolución depende directamente del número de marcas que puede poseer el disco. Para aumentar esta resolución, se puede emplear un método relativamente simple que consta, no únicamente en contar los flancos de subida de los trenes de pulso, sino también contar los de bajada, generando que el captador es capaz de diferenciar un número de posiciones igual a cuatro veces el número de marcas por canal. De esta forma se puede llegar a valores de 100.000 pulsos por vuelta. Este valor puede aumentar usando filtros que modulan el nivel de luz que recibe el receptor, lo que, después de una umbralización del mismo, permite distinguir un número de posición elevado. (Arcil, 2007)

Captadores angulares de posición (sincro-resolvers)

Los resolvers y los sincroresolvers son otra opción en sensores de posición. Estos son captadores analógicos que poseen una resolución infinita (teóricamente). Los resolvers tiene un funcionamiento que esta basado en el

uso de una bobina unida al eje excitada por una portadora, normalmente a 400 Hz, y por un par de bobinas fijas ubicadas a su alrededor figura 21. (Arcil, 2007)

Al girar la bobina móvil provoca que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe, generando que la señal resultante en éstas, dependan del seno del ángulo de giro. La bobina móvil que se encuentra excitada por una tensión $V_{sen}(\omega t)$ y con un ángulo θ induce sobre las bobinas fijas situadas en cuadratura las tensiones mostradas en las ecuaciones 1 y 2 (la cual es llamada como representación del ángulo θ en forma de resolver) (Arcil, 2007)

$$V1 = V \sin(\omega t) * \sin(\theta) \quad (02)$$

$$V2 = V \sin(\omega t) * \cos(\theta) \quad (03)$$

En el caso del funcionamiento de los sincros es similar al de los resolvers, con la diferencia que las bobinas fijas forman un sistema trifásico en estrella. Para un ángulo θ de la bobina móvil que se encuentra excitada por una tensión $V_{sen}(\omega t)$, suponiendo que los desfases y acoplamientos son los mismos para todos los devanados, se obtiene las tensiones siguientes entre las fases del estator (la cual es llamada como representación del ángulo θ en formato síncrono) (Arcil, 2007)

$$V13 = \sqrt{3}V \cos(\omega t) * \sin(\theta) \quad (04)$$

$$V32 = \sqrt{3}V \cos(\omega t) * \sin(\theta + 120) \quad (05)$$

$$V32 = \sqrt{3}V \cos(\omega t) * \sin(\theta + 240) \quad (06)$$

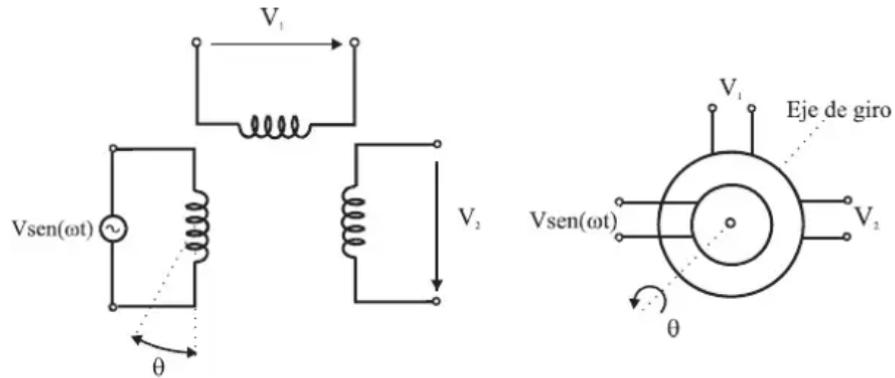


Figura N 21: Esquema de funcionamiento de un resolver

Fuente: Arcil (2007)

Para lograr el cambio de formato sincro a resolver es muy sencillo, solo es necesario el uso de la red Scott o transformada de Scott, de funcionamiento bidireccional, la cual permite pasar de un formato a otro de manera inmediata. Se deben convertir las señales analógicas de los resolvers y los sincros a digital, ya que es necesario para poder tratar el sistema de control. Para lograrlo se usan los convertidores resolver/digital (R/D) que, normalmente, consiste en dos tipos de estructuras distintas: muestreo (*sampling*) y seguimiento (*tracking*). (Arcil, 2007)

Las ventajas más destacadas en los resolvers y sincros, son su buena robustez mecánica durante el funcionamiento y su inmunidad a la humedad, altas temperaturas, contaminación y vibraciones. Debido a que posee un reducido momento de inercia, impone una carga reducida al funcionamiento del eje. En la tabla N°6 se muestra una comparación de los distintos parámetros de funcionamiento de los sensores encoder, resolver y potenciómetro.

Tabla N° 6

Comparación entre distintos sensores óptico de posición angular

	Robustez mecánica	Rango dinámico	Resolución	Estabilidad térmica
Encoder	Mala	Media	Buena	Buena
Resolver	Buena	Buena	Buena	Buena
Potenciómetro	Regular	Mala	Mala	Mala

Fuente: Arcil (2007)

Sensores de desplazamiento lineal:

Si bien no es frecuente la medida de desplazamiento lineal en las articulaciones de los robots, hay casos en los que el grado de desplazamiento y actuador son de traslación, y por ende se debe considerar el uso de este tipo de sensor.

Los sensores lineales usados con relativa frecuencia son las reglas ópticas (que equivalen a los codificadores ópticos angulares). Estos poseen una limitada longitud de recorrido debido a la necesidad de ofrecer una perfecta alineación entre el emisor receptor de luz y la banda que contiene la trama opaco-transparente. (Arcil, 2007)

Los Inductosyn (marca registrada de *Farrand Industries Inc.*), su funcionamiento es parecido al resolver, lo que los diferencia a ambos es que el rotor desliza linealmente sobre el estator, en la figura 21 se representa la forma de los devanados. El estator es excitado por una tensión que induce en el rotor una tensión V_s , la cual depende de su posición relativa. (Arcil, 2007)

LVDT e Inductosyn

El transformador diferencial de variación lineal (LVDT), es un sensor de posición lineal que destaca gracias a su casi infinita resolución, alta repetibilidad y poco rozamiento. Su funcionamiento consiste en el uso de un núcleo hecho de un material ferromagnético acoplado al eje del cual se quiere

medir su movimiento. Este núcleo se desplaza linealmente entre un devanado primario y dos secundarios, generando con su desplazamiento que la inductancia varíe entre ellos. En la figura 22 se muestra un breve esquema de su funcionamiento. (Arcil, 2007)

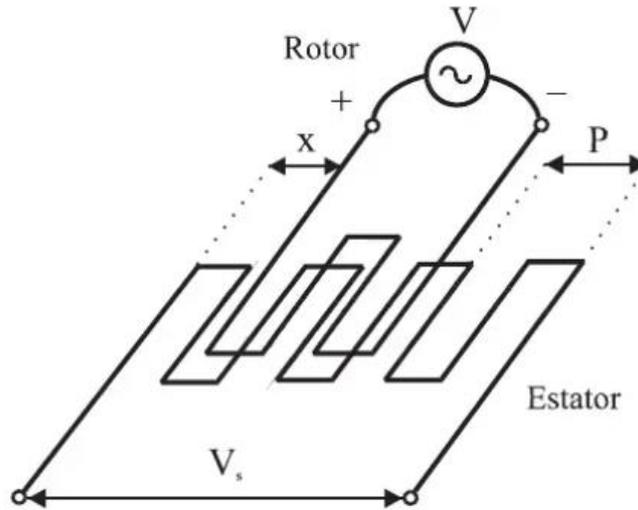


Figura N 22: Esquema de funcionamiento de un Inductosym
Fuente: Arcil (2007)

Los dos devanados secundarios se encuentran en serie, la tensión en estos devanados se ven alterados por la inducción de la tensión alterna del primer devanado, al variar la ubicación del núcleo, la tensión en uno de ellos aumenta mientras que en otro disminuye. La tensión E_0 es proporcional a la diferencia de inductancias mutuas entre el devanado primario y los dos secundarios, y por esta razón la tensión E_0 depende linealmente del desplazamiento del vástago solidario al núcleo. (Arcil, 2007)

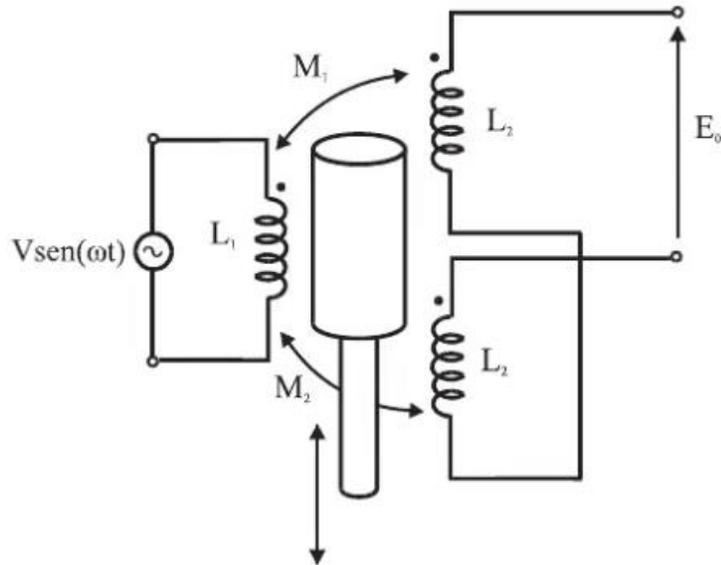


Figura N 23: Esquema de funcionamiento de un LVDT

Fuente: Arcil (2007)

Muy aparte de las ventajas que se indicaron, el LVDT posee una gran sensibilidad, una respuesta dinámica elevada y una alta linealidad. A pesar de que este sensor únicamente se puede aplicar en mediciones de pequeños desplazamientos, su uso está ampliamente extendido. (Arcil, 2007)

$$V_s = KV \cos\left(2\pi \frac{x}{p}\right) \quad (07)$$

L. Sensor de velocidad

El censado de la velocidad es de suma importancia para la mejora del comportamiento de los actuadores que contiene el robot. La velocidad de cada uno de los actuadores (que es la velocidad de la articulación sin el reductor) se realimenta generalmente a un bucle de control analógico implementado en el mismo accionador del elemento motor. Sin embargo, en ciertas ocasiones en donde el sistema de control del robot lo necesite, la velocidad de giro de cada uno de los actuadores es llevada hasta la unidad de control del robot. (Arcil, 2007)

Generalmente, ya que es analógico el bucle de control de velocidad, el captador utilizado es un tacómetro que ofrece una tensión proporcional a la

velocidad de giro de su eje. Otra forma para que la unidad de control del robot cense la velocidad de giro de las articulaciones es derivando la información de posición que ésta tenga. (Arcil, 2007)

M. Sensores de Presencia

Este sensor tiene la capacidad de detectar la presencia de un objeto dentro de un determinado radio de acción. Este tipo de detección se puede hacer con o sin contacto con el objeto. En el segundo caso, se usan distintos principios físicos para lograr detectar la presencia, y así ocasionando los distintos tipos de captadores (ver tabla 7). En el caso de detección con contacto, se usa siempre un interruptor normalmente abierto o normalmente cerrado, acotado de forma mecánica a través de un vástago u otro dispositivo. Principalmente estos sensores se usan como auxiliares de los sensores de posición, para ubicar la posición de referencia de cero de éstos y señalar los límites de movimiento de las articulaciones. (Arcil, 2007)

Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, estos sensores se pueden usar como externos, siendo muy fácil de acoplar al robot por su carácter binario y reducido costo. Los detectores inductivos detectan la presencia o contabilizan los objetos metálicos sin tener contacto. Los detectores capacitivos tienen la misma aplicación, más voluminosos, aunque los objetos que se van a detectar en estos casos no son metálicos. (Arcil, 2007)

En el caso de los sensores basados en el efecto Hall, estos detectan la presencia de un objeto ferromagnético gracias a la deformación que generan en un campo magnético. Los captadores ópticos, en cambio, detectan la reflexión del rayo de luz originado por el emisor sobre el objeto. (Arcil, 2007)

N. Elementos terminales

Los elementos terminales o también denominados efectos finales, son los que se encargan de interactuar con el entorno del robot. Estas pueden ser

herramientas o elementos de aprehensión. En la tabla 7 muestra los tipos de ejecución y sus usos más frecuentes. (Arcil, 2007)

Tabla N° 7

Sistemas de sujeción para robots

Tipos de sujeción	Accionamiento	Uso
Pinza de presión de desplazamiento angular o lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe presionar Piezas de grandes dimensiones
Pinza de enganche	Neumático o eléctrico	o sobre las que no se puede ejercer presión
Ventosas de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico, etc)
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Fuente: Arcil (2007)

O. Elementos de sujeción

Los elementos de sujeción más usados son las pinzas o garras. Normalmente, se usa el accionamiento neumático para sujetar las piezas (FIGURA 24). Se pueden conseguir en el mercado pinzas neumáticas con diversas características, se debe seleccionar en función al tipo de movimientos de los dedos (lineal o angular), el recorrido de estos, la cantidad de dedos (generalmente 2 o 3), la fuerza que generan, tiempo de respuesta y si se necesita ejercer fuerza tanto en apertura como en cierre.



Figura N 24: Pinzas neumáticas para robots

Fuente: Arcil (2007)

Debido a la importancia de que la pinza y la pieza tenga la mayor superficie de contacto, en ciertas ocasiones es necesario diseñar unos dedos a la medida para la pieza a manipular.

2.2.6 Sensores Externos

Se puede definir un sensor como un dispositivo que tiene como objetivo la detección de un estímulo y su traducción en información, mayormente eléctrica. Definiendo este estímulo como una variación física en el entorno (Fraden, 2010). Estos dispositivos poseen una gran importancia en las aplicaciones tecnológicas ya que son la conexión entre el robot y el ambiente que lo rodea, como los son los sentidos para el ser humano.

Existen diversas clasificaciones de estos sensores, dentro de las cuales se pueden mencionar dos de las más comunes que son según el campo de aplicación o por el medio de detección, sin embargo, se tiene una clasificación general para estos dispositivos el cual los distingue como pasivos y activos. Se refiere el término de sensor pasivo a todo aquel que solo requiere de la magnitud a medir, sin necesidad de la intervención de una fuente de energía externa, convirtiendo la magnitud medida en una señal eléctrica. Por el contrario, los sensores activos reciben una fuente eléctrica la cual modulan o varían por acción de los estímulos (Fraden, 2010). Una forma visual de

entender esta clasificación se observa en la figura 25, donde se observa que el sensor pasivo posee como fuente la radiación solar la cual transforma en una señal eléctrica, mientras el sensor activo utiliza energía eléctrica como fuente generando así la perturbación o estímulo para luego obtener la señal eléctrica de salida.

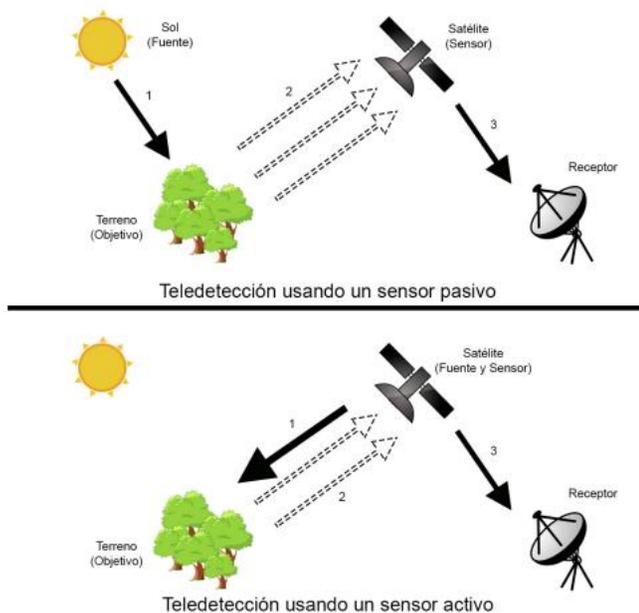


Figura N 25: Ejemplo de sensor pasivo y activo

Fuente: Blanco (2019)

Se puede apreciar con mayor detalle la diferencia entre estos tipos de sensor en la tabla 8 que se adjunta a continuación:

Tabla N° 8

Diferencias entre sensor activo y pasivo

Sensor Pasivo	Sensor Activo
No requiere energía externa	Requiere energizarse
No posee problemas de interferencia con su entorno	Posee ligeros inconvenientes de interferencia
Opera bajo condiciones ambientales específicas	Puede operar bajo distintas condiciones ambientales
Mayor complejidad para interpretar la señal de salida	Facilidad en interpretar la señal de salida
Menor control del ruido	Mejor control del ruido
Bajo costo	Alto costo

Fuente: Charan, Goel y Sinha (2020)

A pesar de que los sensores son dispositivos ampliamente utilizados, más aún en el diseño de robots y sistemas avanzados, estos poseen cierto nivel de complejidad que se evidencia a través de las diversas características que presentan y que deben ser tomadas en cuenta para la elección y utilización de dichos sensores. A continuación, se lista una serie de características y parámetros a considerar (Charan et al., 2020):

- Función de transferencia: Esto es la relación entre los estímulos o información de entrada al sensor (pudiendo ser uno o más) normalmente identificado como (s) y la salida de señal eléctrica, identificada por (S) representado mediante la igualdad mostrada en la fórmula X. Conocer la función de transferencia es la base para comprender el funcionamiento de un sensor, así como su aplicación óptima.

$$S = f(s) \quad (07)$$

- Escala de entradas: Conocido en inglés como “full scale input”, esta representa el diferencial entre los valores máximos y mínimos entre los que fluctúa un estímulo. Esta es representable a través de una fórmula la cual permite relacionar estos valores mínimos (S1) y máximos (S2) representándolos en decibelios.

$$1 \text{ dB} = 20 \log \log \frac{S2}{S1} \quad (08)$$

- Escala de salida: Similar al anterior concepto, este representa a los valores mínimos y máximos de la señal eléctrica de salida cuando son aplicados al sistema (sensor) el valor máximo o mínimo de estímulo a percibir.
- Precisión: Esto hace referencia a la cercanía que tienen los valores de salida del sensor, independiente si estos se asemejan o no al valor esperado. Se puede decir que si las respuestas del sensor poseen poca variación este es preciso.
- Exactitud: A diferencia con la precisión, la exactitud permite identificar la diferencia entre el valor de salida o medido y el valor esperado o verdadero representado como error absoluto y error relativo. El error absoluto nos permite detectar la imprecisión en una serie de medidas, cuya representación es la siguiente:

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor medido} - \text{Valor real}| \quad (09)$$

De realizarse una serie de mediciones bajo las mismas condiciones se toma en cuenta la imprecisión absoluta (Ea) que es la sumatoria de los errores absolutos entre la cantidad de repeticiones ejecutadas (n).

$$Ea = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{Valor medido} - \text{Valor real}|}{n} \quad (10)$$

Se tiene también el error relativo, que resulta de la relación del error relativo entre el valor esperado o verdadero, permitiendo evaluar son confiables o no las mediciones del sensor, está representado como:

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor real}} \quad (11)$$

- Calibración: Este concepto se refiere al concepto de ajustar los parámetros o variables que forman parte de la función de transferencia propia del sensor, en base a su relación con las constantes de dicha función. Esto se

realiza con el fin de conseguir una mayor exactitud a la hora de utilizar el sensor.

- Saturación: Representa el límite de operación del sensor, es decir, a partir de que valor de magnitud de entrada el sensor es incapaz de emitir la señal esperada de salida.
- Resolución: Es la capacidad del sensor de detectar y representar el cambio en la magnitud medida. También se le conoce así al diferencial perceptible y medible de la señal de entrada.

Tipos de Sensores

Dentro de la lista de sensores existentes, existen tipos y modelos conocidos que poseen aplicaciones particulares. A continuación, se lista y detalla una serie de sensores que poseen relevancia para la tesis:

A. Sensor de ultrasonido:

Este es un tipo de sensor que permite determinar la distancia entre el sensor y un objeto a través de la emisión de señales desde un emisor en altas frecuencias, esto conocido como onda ultrasónica, la cual impacta en alguna superficie y es reflejada siendo percibida por un receptor. La distancia se obtiene mediante la relación de la velocidad del sonido (340 m/s) por el tiempo que demora en retornar la onda como se observa en la siguiente ecuación.

$$Distancia\ Total = \frac{(340 * tiempo\ de\ retorno)}{2} \quad (12)$$

La generación de la onda ultrasónica es ocasionada gracias a la aplicación de voltaje sobre un cristal o cerámica piezoeléctrica, el cual debido a sus propiedades físicas empieza a vibrar. De forma inversa al recibir vibraciones este genera señales eléctricas. El sistema mencionado anteriormente puede ser observado en la figura 26, donde se aprecia la interacción del voltaje a través de 2 diodos con la estructura donde se encuentra el componente piezoeléctrico, además de la relación en el tiempo entre el voltaje ofrecido y la vibración efectuada.

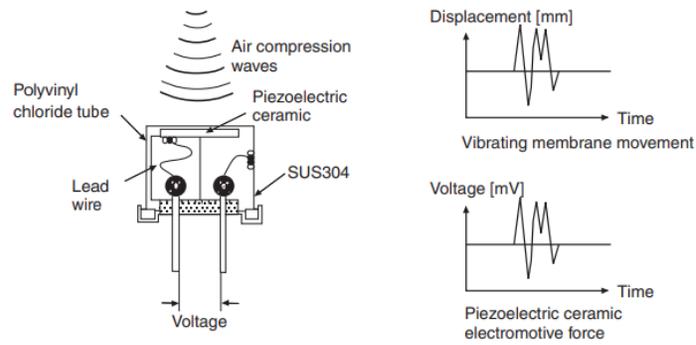


Figura N 26: Estructura de sistema piezoeléctrico excitado mediante voltaje y relación entre voltaje-vibración

Fuente: OMRON (2022)

Al momento de elegir un sensor ultrasónico, se debe de tener en cuenta una serie de consideraciones en base a las propiedades y características de funcionamiento de estos. Una de estas consideraciones es la velocidad del sonido en el medio a analizar, que es el aire, en función de la temperatura cuya relación viene representada mediante la función mostrada en la figura 27.

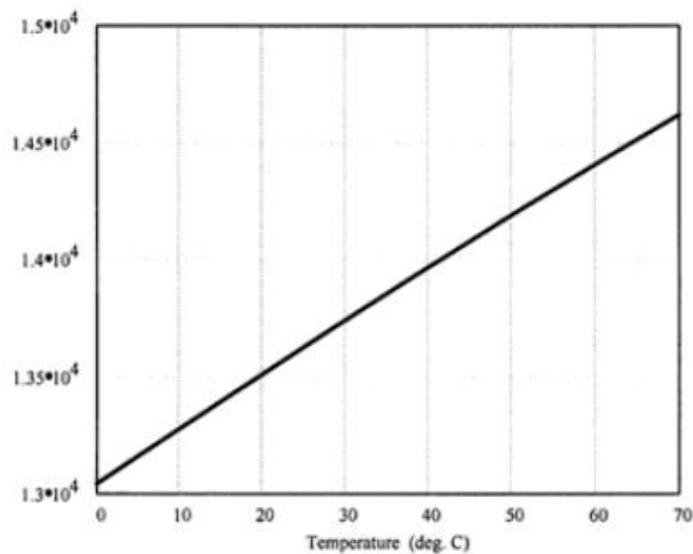


Figura N 27: Velocidad del sonido con relación a la temperatura en el aire

Fuente: Massa (2019)

Esto se representa a través de la siguiente ecuación, donde T es la temperatura en grados Celsius y c(T) es la velocidad en pulgadas por segundo:

$$c(T) = 13.044 * \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (13)$$

Se conoce que el sonido emitido por el sensor se atenúa según la frecuencia a la que se emite, así como la humedad en el ambiente, es por ello que para efectos de diseño y selección de estos sensores es recomendable considerar la máxima atenuación posible en un rango determinado de frecuencias. Esto se puede obtener en base a la siguiente ecuación considerada para un rango de 50 – 300 kHz:

$$\alpha(f) = 0.022 f - 0.6 \quad (14)$$

Donde:

- f = frecuencia de sonido (kHz)
- $\alpha(f)$ = atenuación máxima en dB/pie

En la elección de un sensor de ultrasonido influyen otros factores como el nivel de eco, que es la reflexión de la señal de ultrasonido en una superficie y se ve afectado por la curvatura y propiedades de esta. A esta propiedad se le conoce como “Target Strengt” definido mediante la siguiente fórmula:

$$TS = 10 * \log_{10} \frac{I_R}{I_i} \quad (15)$$

Donde:

- TS = Target Strengt
- I_R = Intensidad del sonido reflectado a una distancia de referencia
- I_i = Intensidad del pulso transmitido

Es importante considerar que al momento de utilizar estos cálculos se debe realizar como referencia o en forma aproximada, ya que un objeto en el

mundo real puede tener formas complejas compuesto de múltiples superficies cada uno con su propio TS.

B. Sensor infrarrojo

Este tipo de sensor tiene la capacidad de obtener información tal como temperatura o movimiento de un objeto (superficie) a través de la detección de la variación de la radiación de dichos objetos. Esto es posible gracias a la interacción de un diodo emisor de luz infrarroja en combinación con un fotodiodo que posee la función de receptor. Esto se observa con mayor detalle en la figura 28.

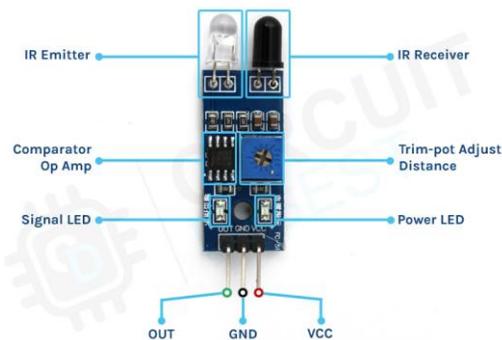


Figura N 28: Partes de un módulo de sensor infrarrojo

Fuente: Das (2022)

Los sensores infrarrojos siguen 3 leyes físicas que son: la Ley de Radiación de Plank que postula que todo objeto cuya temperatura no sea distinta de 0 Kelvin emite radiación, la Ley de Desplazamiento de Wein que indica que el espectro de onda de longitud que emite un cuerpo depende de la temperatura de este, y la Ley de Stephan Boltzman que afirma que un cuerpo negro emite una radiación equivalente al valor de su temperatura elevado a la cuarta potencia. (Electronicshub, 2015)

C. Sensor de fuerza

El sensor de fuerza se considera un componente capaz de detectar la fuerza en sus formas como tensión, presión, torque, peso y transformarlo en señales eléctricas (UTMEL, 2021). Gracias a eso se puede utilizar en

diversas aplicaciones, siendo de interés para esta tesis en particular por la capacidad de determinar la posición de la cabeza de una persona recostada en una superficie.

Su principio de funcionamiento se basa en la utilización de un polímero conductivo el cual posee una serie de partículas las cuales entran en contacto con unos diodos al aplicarles fuerza, lo que genera una variación de la resistencia del polímero (UTMEL, 2021). Esto resulta práctico ya que brinda la posibilidad de generar una banda de sensores de cierto nivel de flexibilidad, el cual puede adherirse a espacios no estrictamente planos, como un sillón dental. La idea mencionada se puede observar en el producto mostrado en la figura 29, el cual es una tira de sensores de resistencias que basan su principio en los sensores de fuerza mencionados cuya forma se observa en la figura 30.



Figura N 29: Potenciómetro lineal de censado de fuerza

Fuente: MBED (2015)



Figura N 30: Sensor de fuerza básico

Fuente: UTMEL (2021)

2.2.7 Algoritmos de evasión de obstáculos

En el transcurso de los años el interés por la creación de robots cuyo funcionamiento pueda ser autónomo ha ido en aumento, teniendo un particular interés por la acción de movilización de dichos robots. Es por lo mencionado

que se han estudiado y creado diversos algoritmos de evasión de obstáculos los cuales tienen como objetivo el brindar al robot las instrucciones que le permitan identificar su entorno y determinar el mejor recorrido para que el robot llegue a su destino en forma efectiva evitando algún tipo de accidente. Estos algoritmos se encuentran estrechamente relacionados a tecnología de sensores aplicada a cada dispositivo, donde en muchos casos, estos implican una gran demanda de procesamiento computacional además de usar sensores de alto costo como son las cámaras para visión artificial (Minzu, Susnea y Vasiliu, 2009).

A continuación, se mencionan los algoritmos de evasión de obstáculos más conocidos que sirvan como base teórica para la tesis:

A. Algoritmo “BUG”

Estos algoritmos son característicos ya que dentro de su proceso operativo se observan 2 comportamientos muy destacables que son la determinación del punto final o meta, y el contorneado que realiza el dispositivo a lo largo del borde del obstáculo en menor o mayor medida dependiendo de la versión de dicho algoritmo. (Serna, Sánchez, Estrada, Bernábe y Pérez, 2019). La particularidad de estos algoritmos es su simpleza en la aplicación además de la poca cantidad de información que requiere para su funcionamiento, sin embargo, esto lo contrapesa con una eficiencia limitada en el tiempo que toma el dispositivo en llegar a su objetivo. El comportamiento descrito se evidencia mejor en la figura 31 que se muestra a continuación.

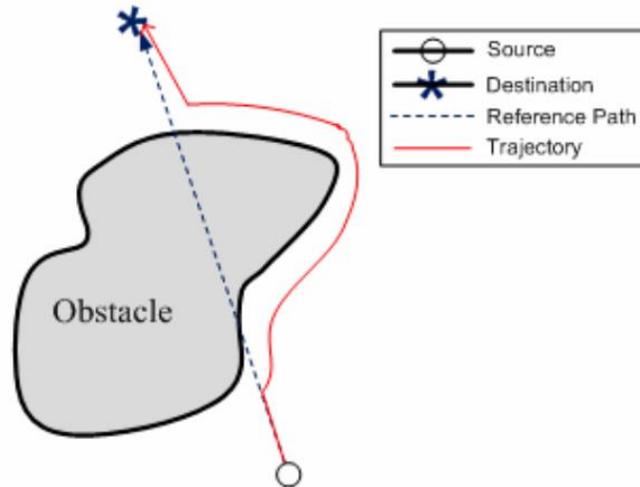


Figura N 31: Ejemplo de trayectoria a recorrer utilizando un algoritmo “dist-BUG”

Fuente: Iqbal, Mustafa y Zohaib (2018)

B. Algoritmo “Vector Field Histogram”

El algoritmo “Vector Field Histogram” o VHF posee como principio de funcionamiento la utilización de sensores de rango como son los de ultrasonido, con los cuales genera un campo alrededor del robot que obtiene información de sus alrededores y lo diagrama llamado histograma polar, el cual posee las dimensiones X y, donde el eje X (horizontal) representa cada uno de los ángulos que rodean el robot y el eje Y (vertical) representa la probabilidad de existencia de un obstáculo. Se puede entender este concepto en forma visual en la figura 32 donde se observa que el robot percibe una baja probabilidad en los ángulos cercanos al 0, que se relaciona con la inexistencia de un obstáculo en dicha dirección, siendo determinada como la dirección a seguir.

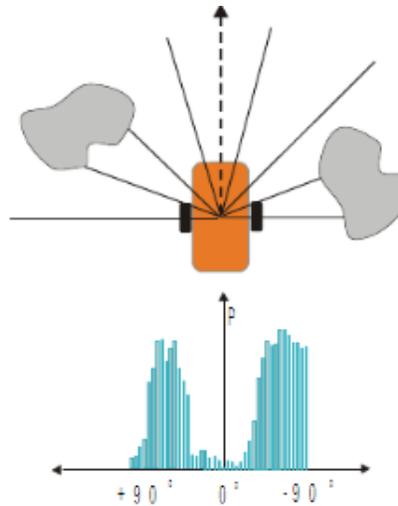


Figura N 32: Histograma polar generado en relación con 2 obstáculos

Fuente: Sunea et al., (2009)

C. Algoritmo “Bubble Band Technique”

El algoritmo de técnica de banda de burbujas, como indica el nombre, determina una “burbuja” alrededor del objeto, que en realidad es la zona segura que posee el robot a sus alrededores basado en su geometría, luego se calcula el recorrido donde se establece una banda o línea de burbujas las cuales se van estirando a medida que la trayectoria planeada se acerque a un obstáculo siendo el objetivo que dicho estiramiento sea el menor posible (Iqbal et al., 2018). La figura 33 brinda una idea de cómo se conforma banda de burbuja a lo largo de la trayectoria.

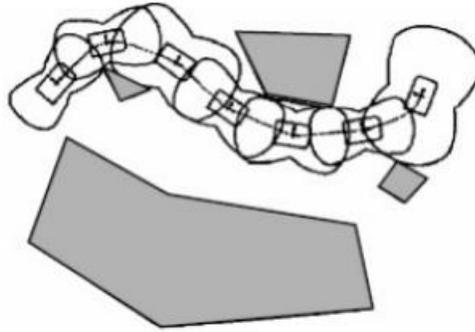


Figura N 33: Técnica de banda de burbujas en el cálculo de trayectoria

Fuente: Mitjans (2014)

2.2.8 Robotic Operating System Framework (ROS)

ROS es un entorno de trabajo de libre acceso el cual contiene una serie de herramientas y librerías las cuales son desarrolladas y compartidas a través de la plataforma por la gran comunidad de desarrolladores que utilizan este sistema. El entorno ROS fue desarrollado por el Laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford, el cual Berger et al. (2008) comenta que tuvo una serie de objetivos o principios para su creación como se exponen a continuación:

- Generar un sistema que permita la conexión punto a punto en la cual los usuarios puedan compartir información en forma directa.
- Brindar soporte a una gran variedad de lenguajes de programación.
- Basado en la integración de diversas herramientas que poseen diferentes funciones las cuales ejecutan labores en forma independiente.
- Permitir la reutilización de código y librerías que no dependen del sistema ROS.
- Ser de acceso libre.

El sistema ROS se encuentra dividido en 3 niveles o conceptos, estos componen las herramientas de las que se sirve para su funcionamiento (Open Robotics, 2014), estas son:

A. Nivel de archivos de sistema ROS:

Este nivel comprende todos los recursos que se encuentran instalados en el almacenamiento interno del programa, está compuesto por:

- Paquetes: Estos son la base de la estructuración del software de ROS, estos contienen procesos conocidos como nodos, librerías, grupos de datos o variables definidas, archivos de configuración.
- Meta-paquetes: son paquetes especializados que sirven de representación para un grupo de paquetes en particular.
- Manifiestos de paquetes: contienen metadata de un paquete, que vienen a ser las características tales como descripción, nombre, información de licencia, dependencias.
- Clases de mensajes: como su nombre indica almacenan la descripción, así como la estructura de los mensajes que se pueden utilizar en ROS.
- Clases de Servicios: Descripciones de los servicios que se pueden utilizar en ROS, así como el detalle de la información de solicitud o respuesta de cada servicio.
- Repositorios: es la agrupación de paquetes que se encuentran en una misma versión de control, lo que permite que puedan ser publicados en forma conjunta mediante el uso de herramientas para el acceso del público.

B. Nivel gráfico-computacional de ROS:

Este nivel se refiere a la red de ordenadores que funcionan como cliente-servidor los cuales se encargan del procesamiento de datos:

- Nodos: son el proceso encargado de realizar alguna acción o cálculo en la red ROS, esto debido a que este sistema está diseñado de forma que pueda funcionar en forma modular, es decir que cada nodo cumple una función y pueden ser invocados para su utilización en un sistema más complejo.
- Maestro: Es registro que permite asignar los nombres, así como encontrar los procesos gráfico-computacionales, gracias al mismo los nodos pueden encontrarse entre ellos, así como invocar servicios o realizar intercambios de mensajes.

- Servidor de parámetros: Este permite que la información pueda ser almacenada mediante una llave (que permite encontrarlo en forma efectiva).
- Mensajes: son el medio de comunicación entre nodos, siendo estructuras que comprenden campos, que son las variables usadas por el nodo invocado.
- Tópicos: permiten la identificación y agrupación de los nodos por tipo, siendo utilizados por los mensajes que estos mismos emiten, empleando un sistema de publicación y suscripción. Existe la posibilidad de coexistir múltiples nodos en un mismo tópico, a su vez un nodo puede pertenecer a más de un tópico.
- Servicios: Debido al modelo de publicación/suscripción mediante el cual se comunican los nodos, se requiere una forma de diferenciar al solicitante y al receptor. Esto se logra a través de los servicios que son estructuras de mensajes, donde el nodo proveedor utiliza dicho servicio según un nombre, enviando así un mensaje de solicitud y queda en espera de una respuesta con la información solicitada.
- Bolsas: son un formato que permite almacenar data de los mensajes, para su posterior uso, como podría ser la data proveniente de un sensor.

C. Nivel de la comunidad de ROS:

Este nivel hace referencia a los recursos que permiten el intercambio de información y código entre diversas comunidades de ROS.

- Distribuciones: con agrupaciones o colecciones de código que se pueden instalar en forma agrupada y que son compatibles para cada versión.
- Repositorios: Se refiere a las librerías donde los usuarios o entidades son libres desarrollar y publicar sus avances.

2.2.9 Microcontrolador y Raspberry Pi

Los microcontroladores se consideran como sistemas de cómputo embebidos en un pequeño chip el cual posee las características y partes más básicas de un computador, como lo son el microprocesador, memoria RAM, memoria ROM y puertos de comunicación (entrada y salida) para su interacción con otros dispositivos tales como sensores, actuadores (Khamdamov, 2020). Se puede observar con mayor detalle un esquema de sus partes, así como la interacción entre estas en la figura 34.

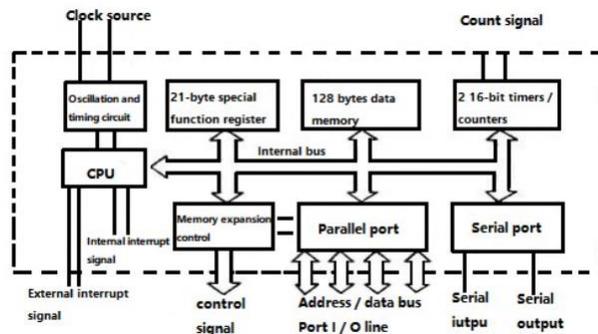


Figura N 34: Diagrama de bloque de un microcontrolador

Fuente: UTMEL (2020)

Tomando como base las capacidades de los microcontroladores, se crea Raspberry Pi, el cual es considerado por sus mismos creadores como un computador de reducido tamaño y costo. Si bien su origen se encuentra vinculado a la aplicación educativa, su gran potencial ha hecho que se vuelva el núcleo de diversos proyectos de mayor complejidad. Lo que diferencia a Raspberry Pi de un microcontrolador tradicional es que Raspberry Pi posee puertos de comunicación popularmente utilizados como se observa en la figura 35, además de ser más potente siendo capaz de contener un sistema operativo basado en sistemas Linux.

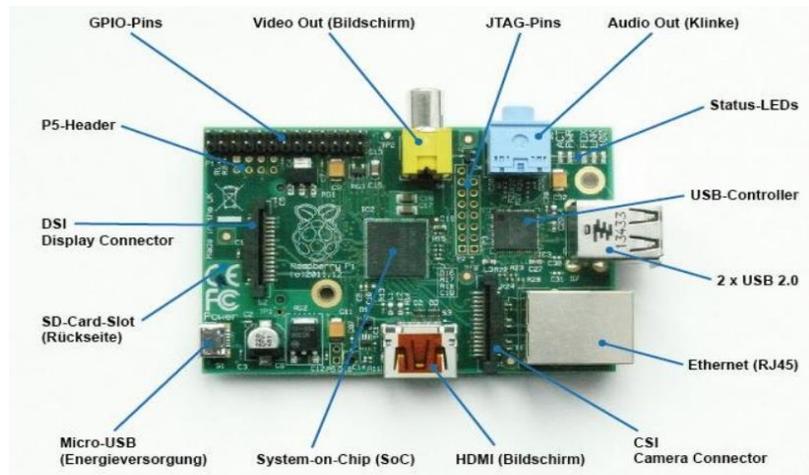


Figura N 35: Partes y componentes de un Raspberry Pi

Fuente: Nayyar (2015)

2.3 Definición de términos básicos

La terminología base utilizada en la presente investigación consta del siguiente vocabulario:

- Acolia: Color de heces muy claras.
- Cefalea: Es dolor o molestia en la cabeza.
- Cirrosis: Es una condición médica donde el hígado tiene un daño permanente.
- Coluria: Color de la orina muy oscura.
- Dermatomas: Área de piel específica que es inervada por un nervio dorsal.
- Endémica: Una enfermedad que afecta a un país o lugar específico.
- Estímulo: Cambio o alteración en el entorno que origina una reacción en el cuerpo que lo percibe.
- Esterilizar: Librar una superficie de agentes infecciosos como son los gérmenes.
- Etiología: Describe las causas de una enfermedad.
- Grados de libertad: Son movimientos independientes que realiza cada articulación con respecto al anterior.
- Hepático: Lesión en el hígado que impide que funcione correctamente.
- Ictericia: Coloración amarillenta que se da en la piel y mucosas.
- Inmunodeficiencia: Es un trastorno que afecta cualquier parte del sistema inmunitario, se presenta cuando el organismo no produce anticuerpos suficientes para combatir una

- Radiación: Es la energía conformada como un conjunto de partículas que se desplaza a lo largo de un medio o espacio.
- Úlceras: Llega que se encuentra en la mucosa que protege al estómago.
- Voltaje: Diferencia de potencial eléctrico entre 2 puntos de un circuito eléctrico.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se menciona el tipo, método y diseño, así como la descripción de cada una de las fases para el desarrollo de la investigación.

3.1 Tipo, método y diseño de la investigación

Tipo de la investigación

La presente Tesis es de desarrollo ingenieril de tipo descriptivo, donde el fin es detallar los pasos a seguir para el diseño de un sistema de posicionamiento autónomo de lámpara dental con lo que se busca reducir el riesgo de contagio de enfermedades de transmisión en consultorios dentales.

Método de la investigación

El método para la presente tesis es de tipo integrador, considerando que se realizará la revisión de diversa información, se realizará una propuesta de diseño la cual se evaluará mediante las herramientas de diseño propuestas, con lo que se brindará un resultado y una conclusión.

Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación se basa en el análisis de la pandemia que la humanidad atravesó en los últimos 2 años, dejando alertas sobre los posibles entornos de riesgo de contagio de enfermedades de transmisiones, donde se busca proponer un diseño de un prototipo que busca reducir dicho riesgo a través de la utilización de herramientas de diseño y simulación con las que se cuenta en la actualidad.

3.2 Descripción del procedimiento de diseño

Fase 1: Diseño mecánico de la estructura que sostiene la lámpara de luz oral autónoma.

- Revisar condiciones y reglamentos que debe seguir un equipamiento a utilizarse en el ámbito médico.

- Determinar el espacio operativo y límites del área en la cual se movilizará la lámpara oral.
- Diseñar la trayectoria del sistema, a través de la elección de las articulaciones y dimensionamiento de los eslabones.
- Analizar esfuerzos y calcular torques para la elección de los actuadores.

Fase 2: Diseño del sistema eléctrico y electrónico.

- Determinar la comunicación entre sistema de control y los actuadores.
- Diseñar arreglo de sensores que han de componer el sistema de movimiento autónomo de la lámpara de luz oral.

Fase 3: Desarrollo del algoritmo de la lámpara de luz oral autónoma y simulación.

- Analizar el arreglo de sensores y determinación de relación de variables para la generación del algoritmo.
- Preparar el sistema integrado entre Raspberry Pi y Robotic Operating System implementando la programación según la lógica planteada.
- Establecer la comunicación entre el sistema de control y la simulación.

CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO AUTÓNOMO DE LA LÁMPARA

En este capítulo se procede a detallar las fases que comprenden el diseño del sistema de posicionamiento autónomo de la lámpara de luz oral, que comprende el análisis del proceso actual, diseño de la estructura mecánica del prototipo y elección de actuadores, selección de sensores vinculados a la detección del odontólogo y programación del sistema de movimiento autónomo a través de la herramienta ROS, además de su simulación.

4.1 Análisis de área de trabajo de la lámpara de luz oral y estado actual

Actualmente las lámparas de luz oral forman parte de un sistema de mayor complejidad que es el sillón dental, estos manejan cierto estándar en sus medidas, claro que esto puede variar entre modelos, pero el cambio no es drástico, por ello se está tomando el modelo estándar de la marca Belmont, quienes ponen a disposición las medidas de su modelo en su página web.

Se aprecia en la imagen 36 y 37 las distancias donde por observación se tiene que la altura total del sistema y donde se encuentra el punto más alto del sistema de la lámpara de luz oral se encuentra a unos 2.3 metros, adicionalmente el paciente recostado suele encontrarse al nivel del portaherramientas, el cual tiene una altura de 1.2 metros.

■ Chair Mount -original-

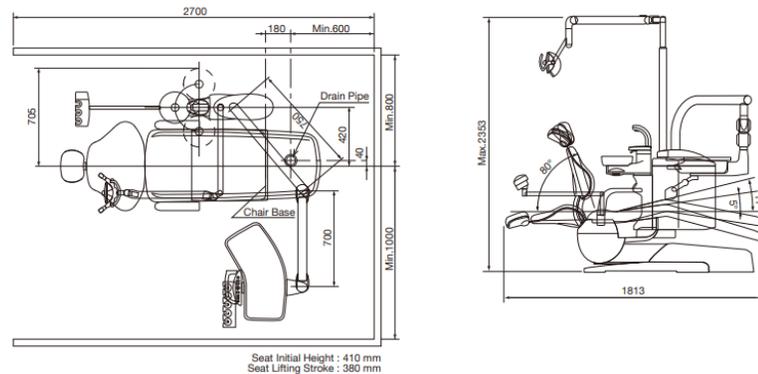


Figura N 36: Dimensiones de una silla dental estándar Belmont

Fuente: Belmont (2022)

■ Cart Type

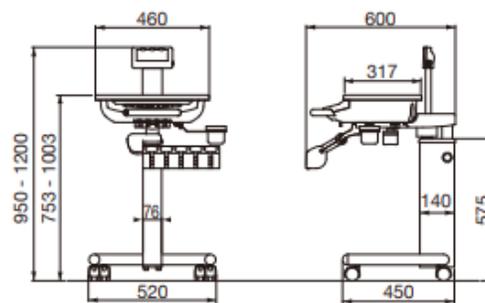


Figura N 37: Dimensiones de portaherramientas estándar Belmont

Fuente: Belmont (2022)

Tomando dichas dimensiones en consideración se puede decir que se tiene un aproximado de 1 metro de distancia entre el punto máximo de la estructura y la posición del paciente, desde el cual se deberá diseñar la estructura motriz del sistema autónomo, considerando el espacio o plano en el cual se desplazará el efector final del sistema, que es la lámpara propiamente.

Otro aspecto por considerar es el proceso actualmente efectuado por el odontólogo, el cual consiste en realizar la intervención médica con la necesidad de reposicionarse para alcanzar ciertas superficies de la cavidad bucal, esto lleva a la fuente de luz que ofrece la lámpara quede obstruida por el mismo profesional de la

salud. Esto obliga a que este deba para su actividad, lo que reduce tiempo y concentración, para manualmente posicionar la lámpara de luz de forma que incida correctamente sobre el paciente, entrando en contacto con la superficie de este implemento, que, a diferencia de las herramientas, no puede ser extraído para ingresarlo a una cámara de esterilización.

En base al anterior párrafo, se tiene el siguiente diagrama que indica el flujo actualmente efectuado durante una consulta médica y el contraste con el flujo de atención que se consigue de ser implementado el prototipo.

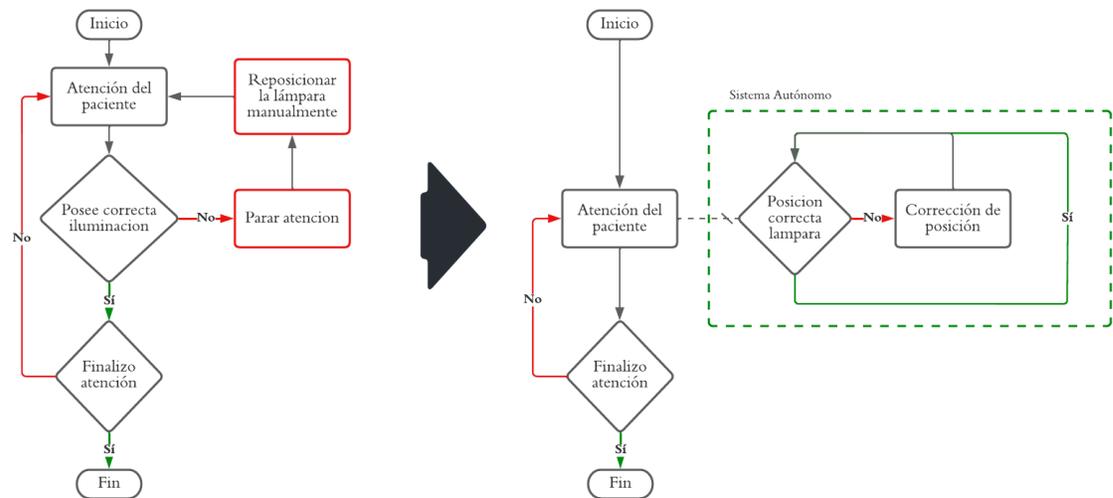


Figura N 38: Comparación entre atención tradicional (izquierda) y atención asistida (derecha)
Fuente: Elaboración propia

4.2 Diseño de estructura motriz del sistema autónomo y cálculos de cinemática

En esta sección delimitamos los requerimientos necesarios para el diseño del proyecto, en base a ellos se definirá los grados de libertad, la disposición de los motores, el material de la estructura y modelamiento en 3D del sistema.

4.2.1 Requerimientos

Se define los requerimientos mecánicos principales para la estructura de la lámpara de luz oral, para definir los requerimientos se deberá tener en cuenta la estructura de la lámpara de luz oral de una unidad dental convencional, para no

generar cambios bruscos en el área de trabajo del odontólogo. En la tabla 9 se muestran los principales requerimientos mecánicos.

Tabla N° 9

Parámetros del sistema

Parámetros	Capacidad	Descripción
Grafos de libertad	De 4 a 5 grados de libertad	El diseño de la lámpara de luz oral de poder ubicarse en toda el área de trabajo del odontólogo
Dimensiones máximas	Altura máxima 200cm	El alcance la lámpara de luz oral está definida por su área de trabajo
Recubrimiento	Pintura epóxica	La estructura debe estar recubierta en pintura epóxica

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 Elección de la estructura mecánica de la lámpara de luz oral

Considerando los requerimientos indicados en la tabla 9, se requiere que el sistema tenga, como mínimo, 4 grados de libertad, debido a ello el tipo de configuración más adecuada es la de un brazo robótico de configuración angular del tipo RRRR (Rotacional – rotacional – rotacional – rotacional). Los grados de libertad están distribuidos de tal forma se asemeje a la estructura de una lámpara de luz oral ordinaria, como se puede observar en la figura 39.

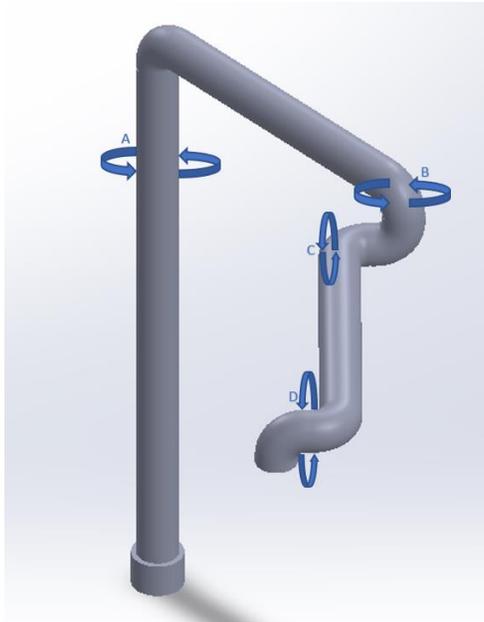


Figura N 39: Estructura mecánica de la lámpara de luz oral

Fuente: Elaboración Propia

Según estas las especificaciones mencionadas, se asignó las medidas necesarias para que el extremo del sistema (lámpara de luz oral) logre posicionarse de tal forma que se mantenga enfocando al paciente sin interrumpir al odontólogo.

Del sistema que se propuso, se tiene las consideraciones siguientes:

- La articulación “A” está ubicada a 170 cm del suelo, movimiento perpendicular al plano XY y se encarga de rotar al sistema en ángulos de 0° a 180° en el plano XY.
- El primer eslabón debe ser capaz de sostener todos los elementos que están posteriores a él.
- La articulación “C”, con movimiento perpendicular al eje YZ se encarga de ubicar el extremo del sistema en el plano YZ (de arriba abajo)
- La articulación “B” y “C” se encargan de dar mayor precisión en los planos XY e YZ respectivamente.

4.2.3 Disposición mecánica de motores

Como se mencionó anteriormente, la idea principal es que el sistema pueda replicar los movimientos de una lámpara de luz dental común, como se muestra en la figura 40, por este motivo, la disposición de todos los motores es al interior del sistema, el primer motor se ubica en la estructura principal que sostiene a todo el sistema, el segundo motor este se encuentra al extremo del primer eslabón, el tercer motor en consecutivo al segundo motor y el cuarto al extremo de todo el sistema conectado a la lámpara.

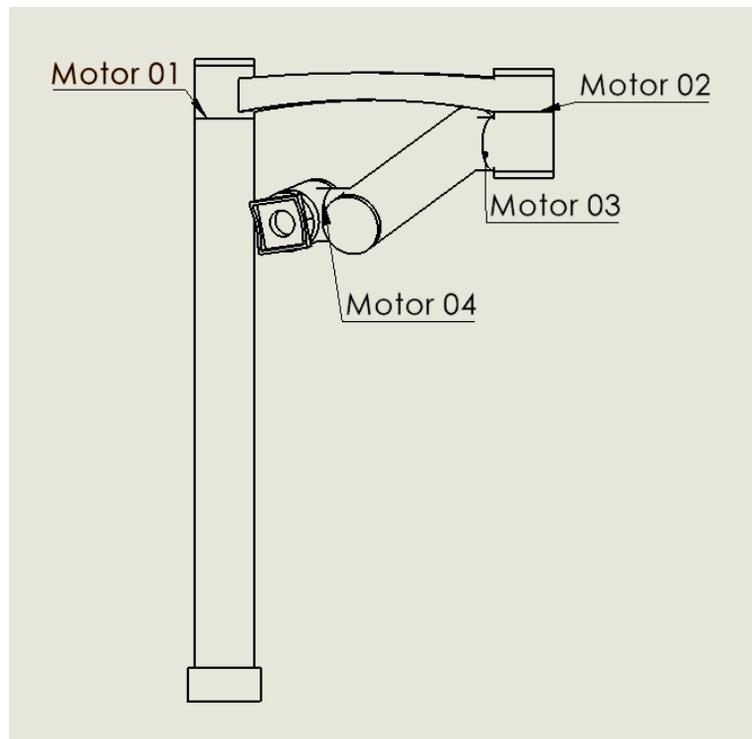


Figura N 40: Disposición de los motores en la lámpara de luz dental

Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Selección de material de la estructura

Se debe tener en consideración que el material de fabricación de toda la estructura debe ser liviano para que no incremente el torque requerido en el sistema, pero a su vez manteniendo una rigidez para que no se generan deformaciones en el material. Los dos materiales que se analizan son aluminio y acero al carbono. En la tabla 10 se muestra las características principales de cada uno de estos materiales.

Tabla N° 10

Comparación de materiales para la estructura mecánica del sistema

Características	Acero al carbono	Aluminio 6061
Límite elástico	550 Mpa	125 Mpa
Módulo de elasticidad	206.8 GPa	68.9 GPa
Dureza	1-160 HB	94 HB
Densidad	7.5 g/cm ³	2.7 g/cm ³
Costo	Bajo	Medio

Fuente: Elaboración propia

Si bien la gran mayoría de unidades dentales están hechas de acero al carbono, en esta ocasión se selecciona el aluminio 6061 debido a que posee una baja densidad a diferencia del acero al carbono y el precio no es muy elevado. (agregar un posible anexo)

4.2.5 Cálculo y modelamiento 3D de la estructura mecánica

Usamos el software SOLIDWORKS para el modelamiento 3D, para ensamblar las piezas y la interacción de la simulación mecánica.

Diseño de la estructura mecánico de la base

En la figura 41, se muestra el diseño de la estructura mecánica de la base de la lámpara de luz oral, esta estructura debe ser capaz de soportar, sin ninguna dificultad, todo el sistema. Esta pieza tiene en su extremo superior un orificio que sirve para conectarse con el primer eslabón.

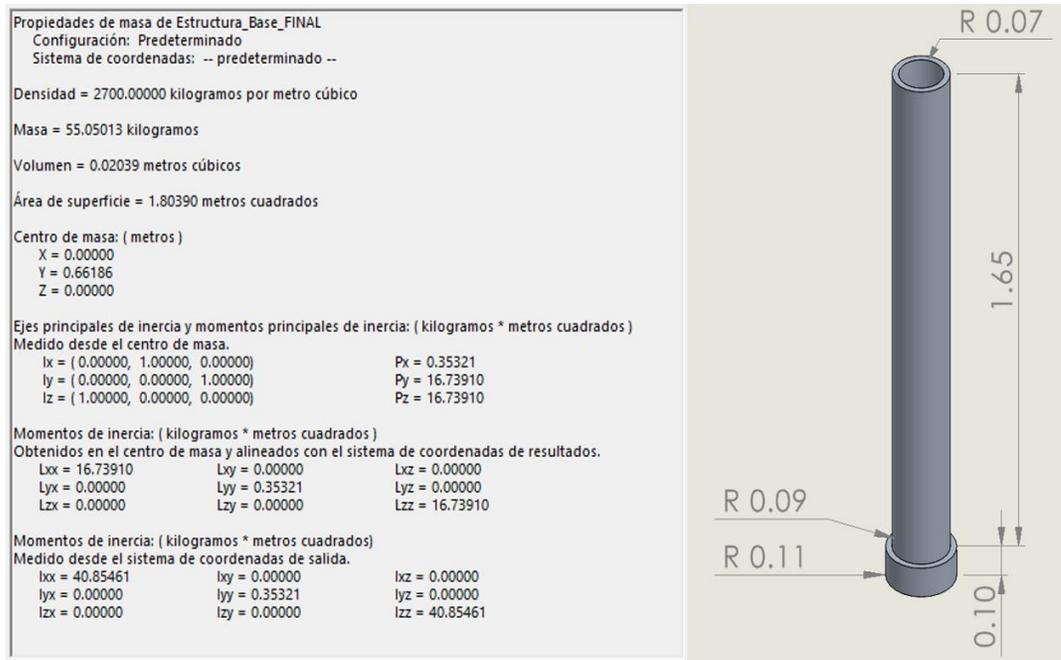


Figura N 41: Diseño de la estructura de la base

Fuente: Elaboración Propia

Diseño del eslabón 1

En la figura 42, se muestra el diseño del primer eslabón del sistema, en esta estructura posee dos orificios, de los cuales uno es para conectarse con la base y el otro con los demás componentes del sistema. Esta pieza debe resistir esfuerzos elevados, por esta razón, se escogió un diseño curvo además de ser una estructura sólida y resistente. En la figura 43 se muestra la simulación en SolidWorks respecto a una fuerza aplicada.

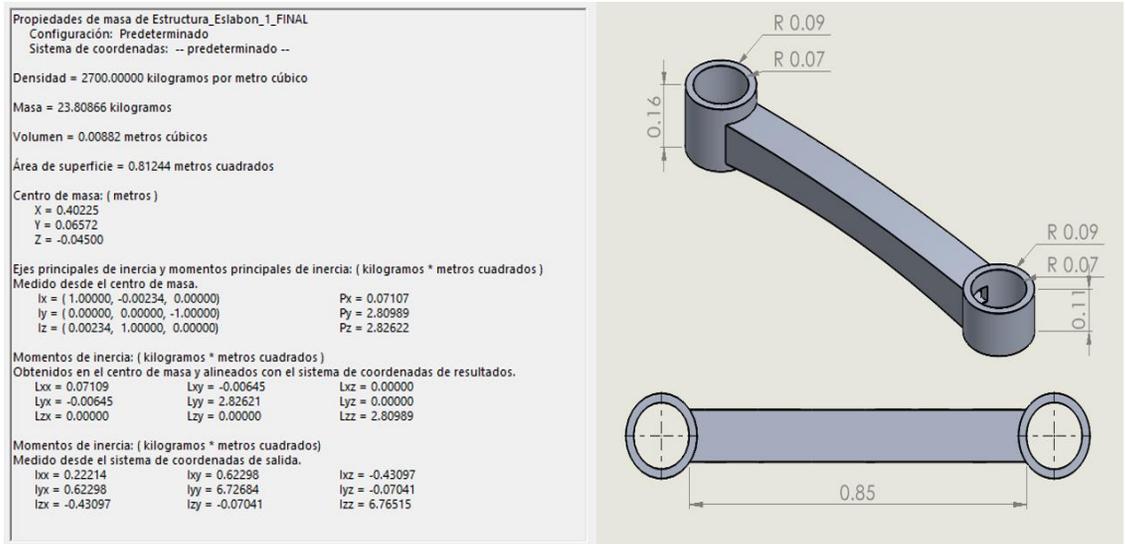


Figura N 42: Diseño de eslabón 1

Fuente: Elaboración Propia

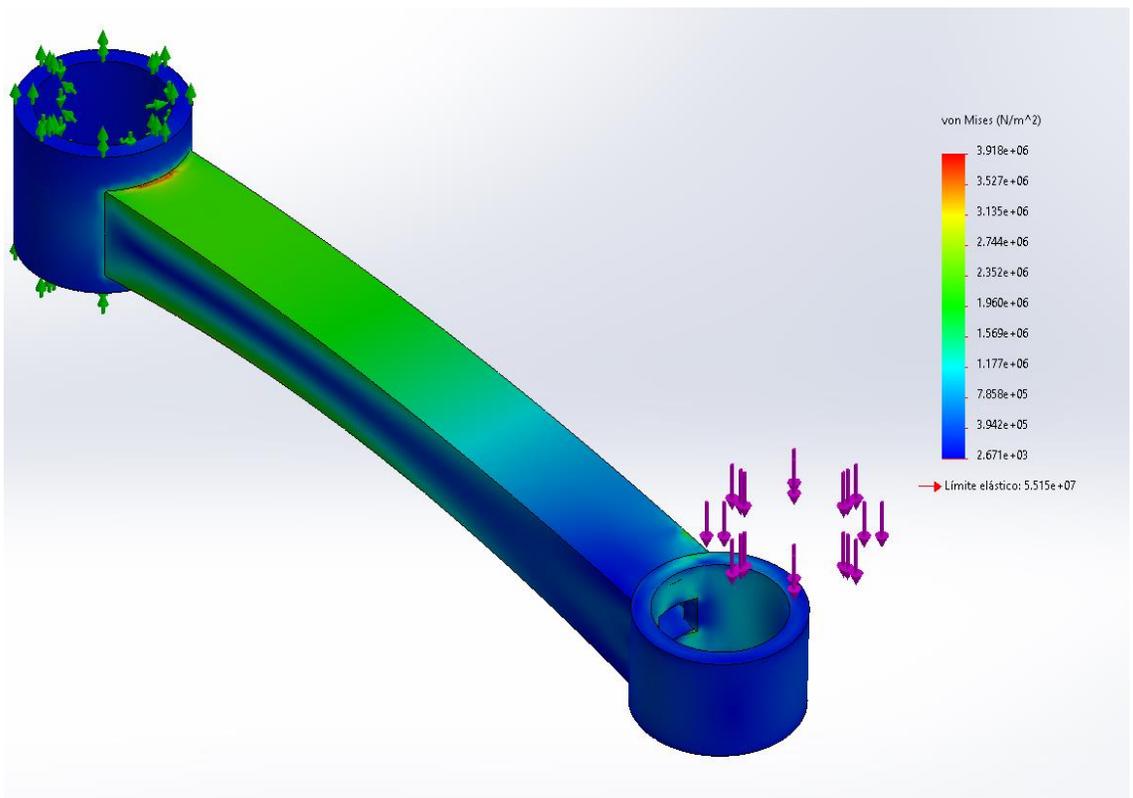


Figura N 43: Análisis de Tensión en el eslabón 1 en SolidWorks

Fuente: Elaboración Propia

Diseño del eslabón 2

En la figura 44, se muestra el diseño y características del segundo eslabón, este posee orificios opuestos en sus extremos, los cuales son para acoplarse al primer eslabón y la lámpara. Este eslabón, al igual que el primero, debe ser capaz de soportar esfuerzos elevados, pero en menor magnitud.

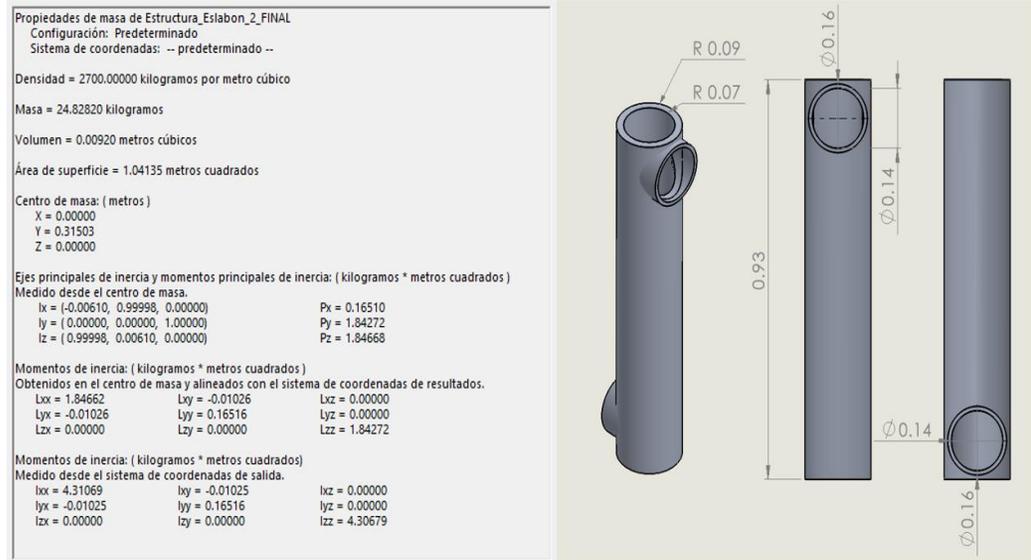


Figura N 44: Diseño del eslabón 2

Fuente: Elaboración Propia

Diseño de la Lámpara

En la figura 45, se observa el diseño y características de la lámpara, esta es la pieza final del sistema, en ella se ubican solos sensores y componentes que permitirán a la lámpara de luz oral ubicarse en cualquier punto de su área de trabajo.

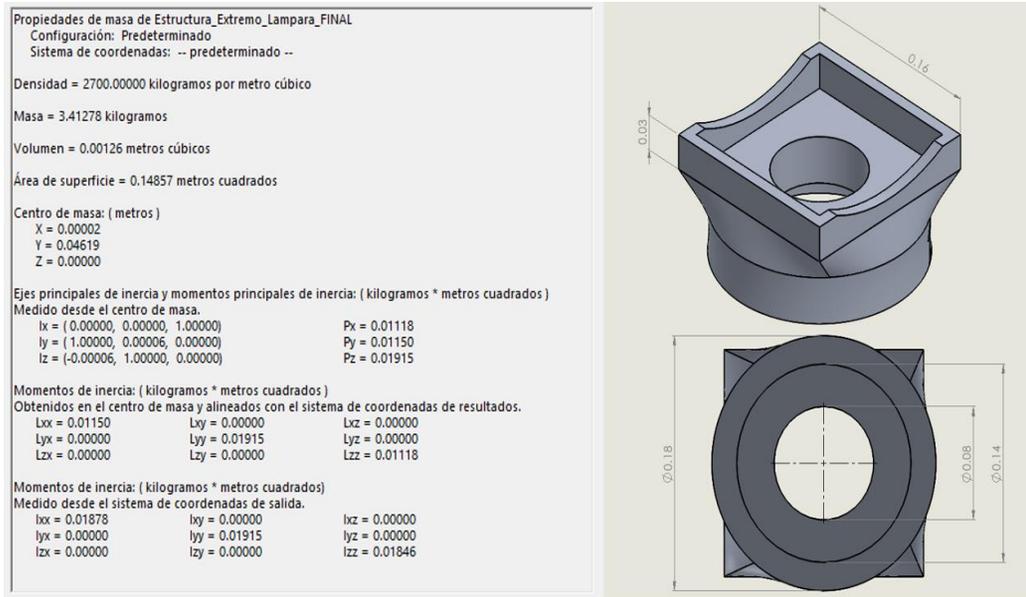


Figura N 45: Diseño de la lámpara

Fuente: Elaboración propia

Diseño del conector

En la figura 46, se observa el diseño y características del conector, en la estructura se usan dos de estas piezas, la primera es para conectar el eslabón 1 con el eslabón 2 y la segunda es para acoplar el eslabón 2 con la lámpara del sistema.

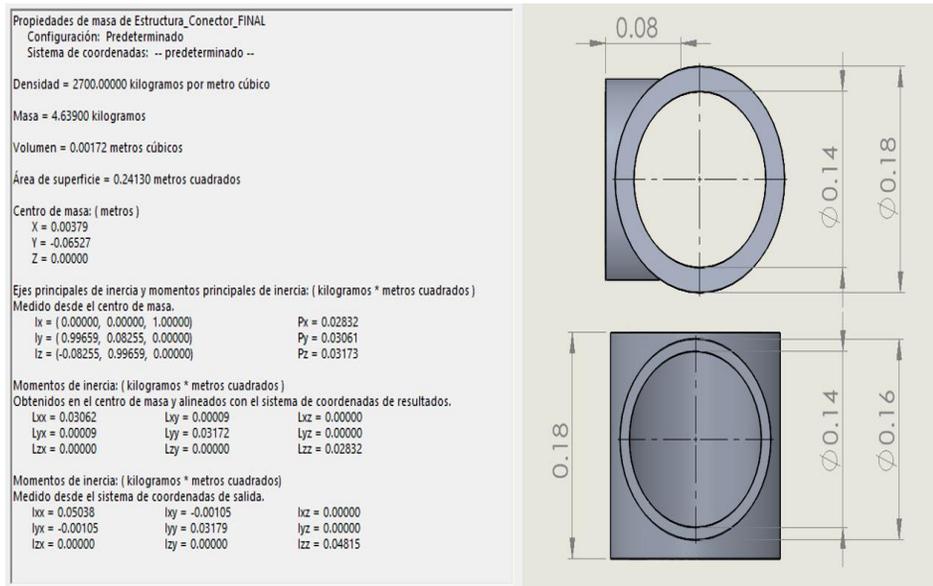


Figura N 46: Diseño de conector

Fuente: Elaboración propia

Diseño de tapa

La función que cumple esta pieza es la de facilitar el mantenimiento de los motores, ya que, estas están ubicadas cerca a los motores, en la lámpara de luz oral se tienen seis de estas piezas, en la figura 47 se muestra su diseño y características.



Figura N 47: Diseño de tapa

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Cinemática de la estructura

El modelo cinemático es una de las herramientas necesarias para controlar la estructura del sistema, esta herramienta ayuda a conocer la relación entre la rotación de los actuadores y la posición, además también sirve para la orientación del actuador final. Obteniendo los parámetros de Denavit-Hartenberg podremos determinar el espacio de trabajo de la lámpara de luz oral. Estos parámetros se obtienen de la geometría del sistema y construcción de este. En la figura 48 y la figura 49 se muestran los sistemas de referencias de cada uno de los ejes de cada articulación.

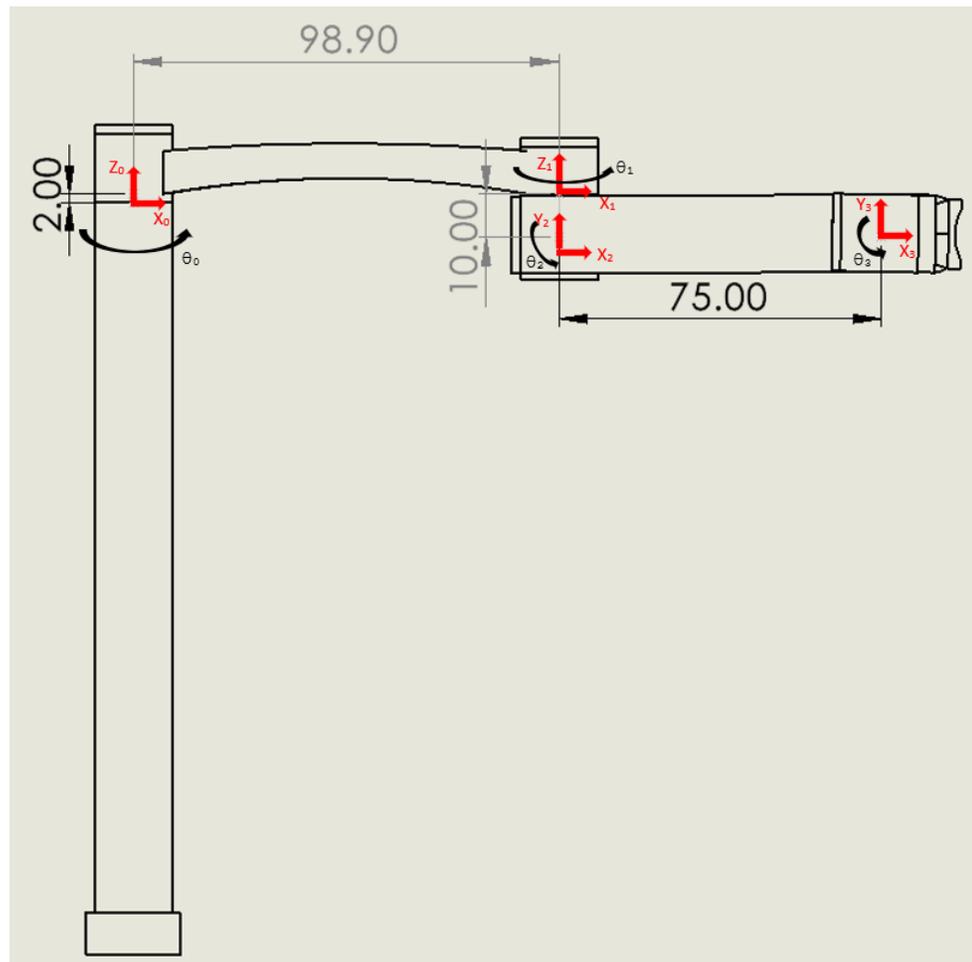


Figura N 48: Sistemas de coordenadas del sistema según D.H.

Fuente: Elaboración Propia.

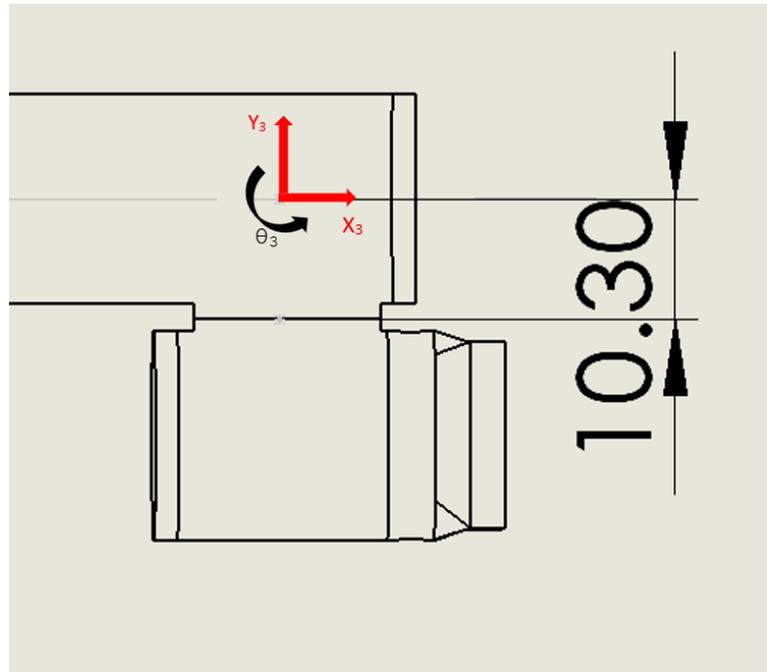


Figura N 49: Sistemas de coordenadas del sistema según D.H.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 11, se muestran los parámetros del sistema según los dieciséis pasos de Denavit-Hartenberg, estos son usados para generar las matrices de transformación de cada uno de los grados de libertad del sistema.

Tabla N° 11

Parámetros de D-H

Eslabón	$\theta_i(^{\circ})$	$d_i(\text{cm})$	$a_i(\text{cm})$	$\alpha_i(^{\circ})$
1	θ_1	2.00	98.90	0
2	θ_2	-10	0	90
3	θ_3	10.3	75	0

Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario obtener la matriz de transformación del sistema completo para la resolución del problema cinemático directo y para lograr esta matriz, se hará por separado cada una de las matrices de transformación de los eslabones.

Matriz de transformada del eje inicial al eje 1:

$${}^0_1T(\theta_1, d_1, a_1, \alpha_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\text{sen}(\theta_1) & 0 & 98.90 * \cos(\theta_1) \\ \text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 98.90 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 2.00 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de transformada del eje 1 al eje 2:

$${}^1_2T(\theta_2, d_2, a_2, \alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \text{sen}(\theta_2) & 0 \\ \text{sen}(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de transformada del eje 2 al eje 3:

$${}^2_3T(\theta_3, d_3, a_3, \alpha_3) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\text{sen}(\theta_3) & 0 & 75 * \cos(\theta_3) \\ \text{sen}(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 75 * \text{sen}(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 10.30 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación del sistema completo quedaría de la forma siguiente:

$${}^5_0T = {}^1_0T \times {}^2_1T \times {}^3_2T \quad (16)$$

4.3 Análisis de torques y selección de actuadores

En esta etapa se hace el análisis del torque que requiere cada uno de los motores en una posición crítica de la lámpara de luz oral y también se hará la selección del tipo de motores para cada eje.

4.3.1 Cálculo del torque que requiere cada motor

Lo primero que se debe tener en cuenta para la selección de los motores son las limitaciones de las articulaciones, esto se debe a que ninguna de ellas posee una rotación completa.

Lo segundo que se debe tener en cuenta es el peso de cada una de las piezas, mediante el software SolidWorks se asignó, a cada una de las piezas, el material aluminio 6061, como se muestra en figuras 50, en ellas se verificó cada una de las características de acuerdo a sus dimensiones y morfología, en la tabla 12 se muestran las características más resaltantes para el cálculo.

Propiedades de masa de Estructura_Base_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 55.05013 kilogramos Volumen = 0.02039 metros cúbicos Área de superficie = 1.80390 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.00000 Y = 0.66186 Z = 0.00000	Propiedades de masa de Estructura_Eslabon_1_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 23.80866 kilogramos Volumen = 0.00882 metros cúbicos Área de superficie = 0.81244 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.40225 Y = 0.06572 Z = -0.04500
Propiedades de masa de Estructura_Eslabon_2_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 24.82820 kilogramos Volumen = 0.00920 metros cúbicos Área de superficie = 1.04135 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.00000 Y = 0.31503 Z = 0.00000	Propiedades de masa de Estructura_Extremo_Lampara_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 3.41278 kilogramos Volumen = 0.00126 metros cúbicos Área de superficie = 0.14857 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.00002 Y = 0.04619 Z = 0.00000
Propiedades de masa de Estructura_Conector_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 4.63900 kilogramos Volumen = 0.00172 metros cúbicos Área de superficie = 0.24130 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.00379 Y = -0.06527 Z = 0.00000	Propiedades de masa de Tapa_FINAL Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado -- Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico Masa = 0.95850 kilogramos Volumen = 0.00036 metros cúbicos Área de superficie = 0.06660 metros cuadrados Centro de masa: (metros) X = 0.00000 Y = 0.00783 Z = 0.00000

Figura N 50: Características técnicas de las piezas mediante el Software SolidWorks

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 12

Características de masa, área y volumen de las piezas de la lámpara de luz oral

Piezas	Masa (Kg)	Área(m²)	Volumen(m³)
Base	55.06 Kg	1.80 m ²	0.02039 m ³
Eslabón 1	23.81 Kg	0.82 m ²	0.00882 m ³
Eslabón 2	24.83 Kg	1.05 m ²	0.00920 m ³
Extremo Lámpara	3.42 Kg	0.15 m ²	0.00126 m ³
Conector	4.64 Kg	0.25 m ²	0.00172 m ³
Tapa	0.96 Kg	0.07 m ²	0.00036 m ³

Fuente: Elaboración Propia

Con la información indicada en la tabla 12 se procede a realizar los cálculos de los torques para cada articulación, con la finalidad de tener un punto de inicio para la selección de los actuadores.

Para obtener el cálculo de los torques, el sistema debe estar posicionado de manera muy crítica, para ello, la lámpara debe estar estirada y dejando que la fuerza de gravedad actúe sobre ella, en la figura 48 se muestra el sistema en posicionado de manera crítica.

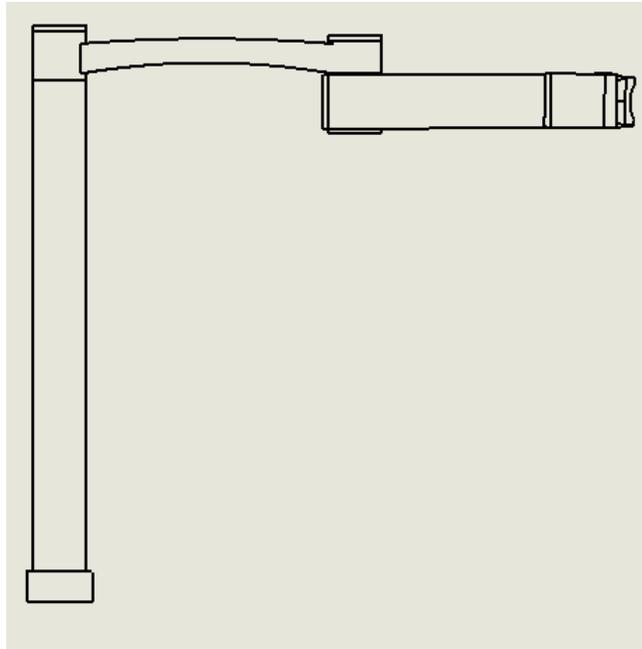


Figura N 51: Sistema posición crítica

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los torques se iniciará desde el extremo del sistema (EJE 4), esto se hace con la finalidad de considerar la masa de los motores y reductores al momento de hacer el análisis de torques.

- A. Para obtener el torque en el EJE 4 se usará la ecuación 17 y para los cálculos se usarán la figura 52 y la figura 53 las cuales muestran el diagrama de cuerpo libre y las distancias con respecto al EJE 4.

$$\vec{T} = (Fuerza * Distancia * \sin\theta).... (17)$$

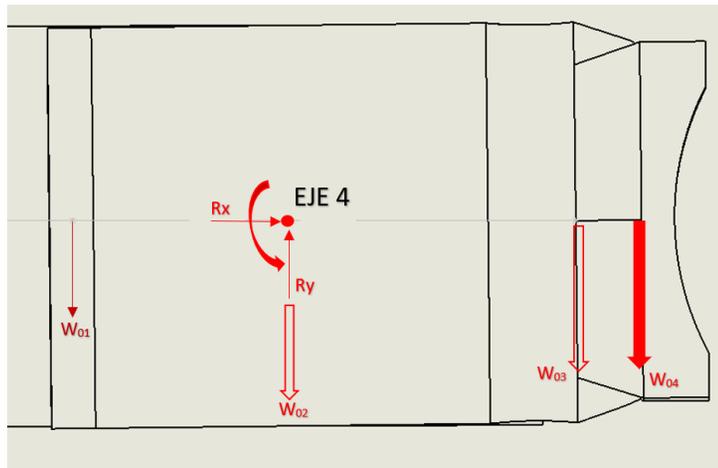


Figura N 52: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 4 (vista perfil izquierdo)

Fuente: Elaboración Propia.

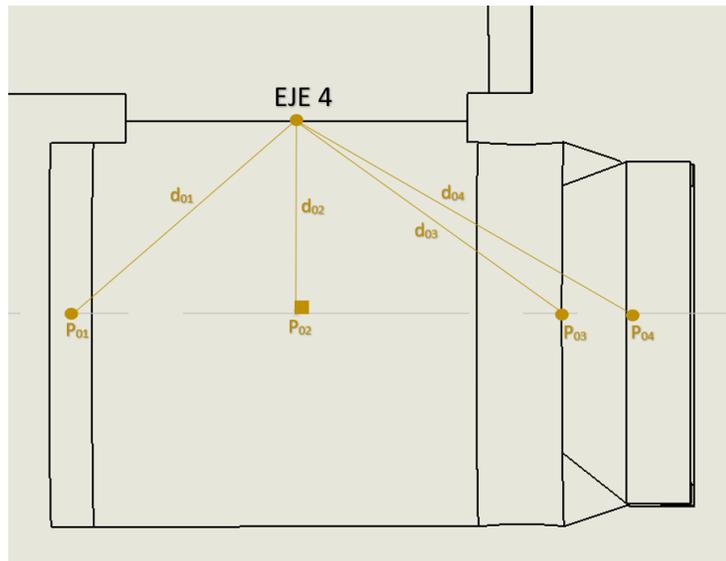


Figura N 53: Diagrama de distancias con respecto al EJE 4 (vista planta)

Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

W_{01} , el peso de la tapa 1.

W_{02} , el peso del segundo conector.

W_{03} , el peso del extremo del sistema.

W_{04} , el peso de los componentes de la lámpara.

Las masas de los componentes mencionados anteriormente son:

$$W_{01} = 0.96\text{kg}; W_{02} = 4.64\text{kg}; W_{03} = 3.42\text{kg}; W_{04} = 2.00\text{kg}$$

Las distancias con respecto al EJE 4 son las siguientes:

$$d_{01} = 0.135\text{m}; d_{02} = 0.090\text{m}; d_{03} = 0.167\text{m}; d_{04} = 0.184\text{m}$$

Usando la ecuación 17 se tiene:

$$T4 = -(W_{01} * d_{01}) + W_{02} * d_{02} + W_{03} * d_{03} + W_{04} * d_{04}$$

$$T4 = 0.96 * (-0.135) + 4.64 * 0.09 + 3.42 * 0.167 + 2.00 * 0.184$$

$$T4 = 1.23 \text{ Kg. m}$$

$$T4 = 12.07 \text{ N. m}$$

Ya que el torque en el EJE 4 tiene un valor de 12.07 N.m, se usará un reductor CSF-17-50-2UH-SP de la marca *HarmonicDrive* y un motor NEMA 23.

- B. Para calcular el torque en el EJE 3, también se usará la ecuación 17 y para los cálculos la figura 54 y la figura 55.

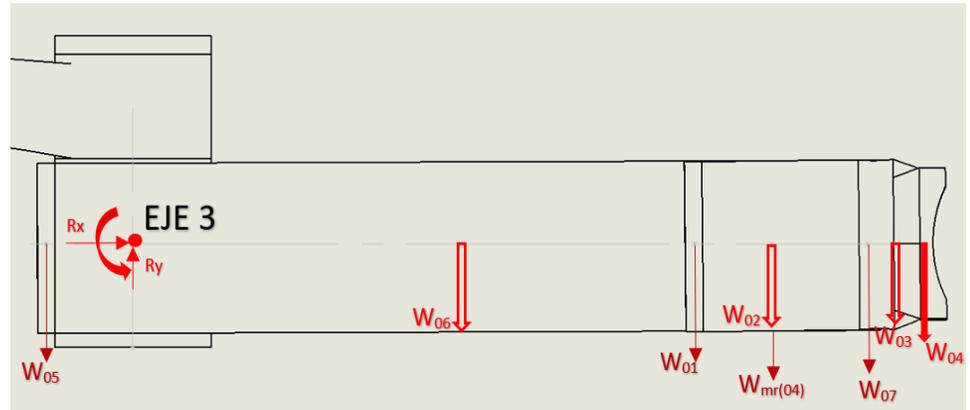


Figura N 54: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 3 (vista perfil izquierdo)

Fuente: Elaboración Propia

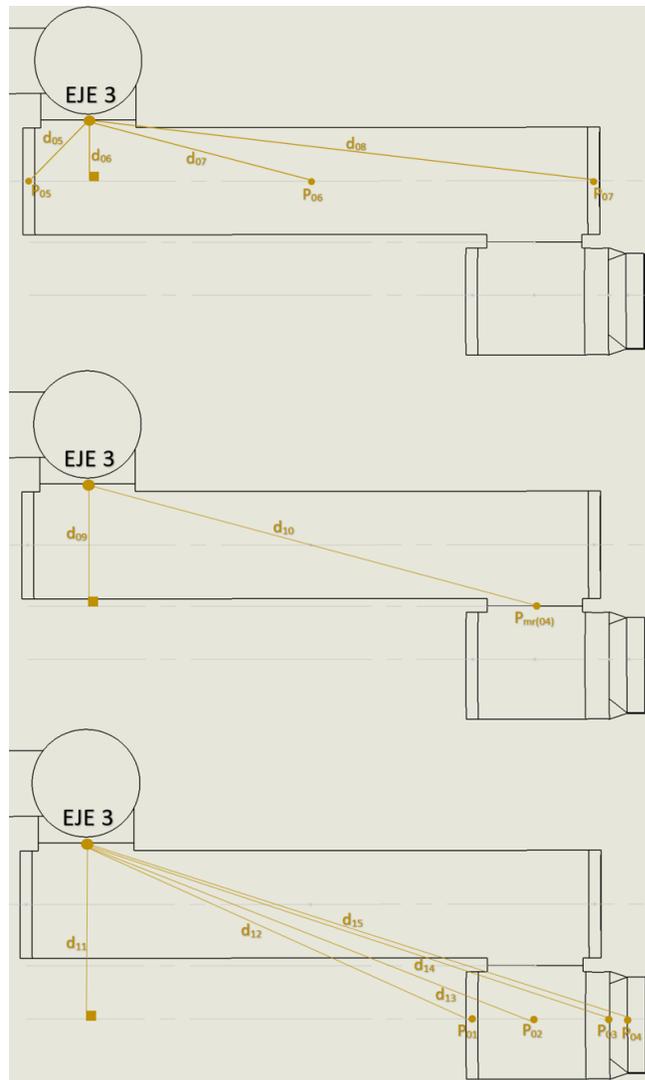


Figura N 55: Diagramas de distancias con respecto al EJE 3 (vista planta)

Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

W_{05} , el peso de la tapa 3.

W_{06} , el peso del eslabón 2.

W_{07} , el peso de la tapa 2.

$W_{mr(04)}$, el peso del motor 4 junto al reductor.

La masa de cada uno los componentes mencionados anteriormente son:

$$W_{05} = 0.96\text{kg}; W_{06} = 24.83\text{kg}; W_{07} = 0.96\text{kg}; W_{mr(04)} = 1.38\text{kg}$$

Las distancias con respecto al EJE 3 son las siguientes:

$$d_{05} = 0.14\text{m}; d_{06} = 0.10\text{m}; d_{07} = 0.39\text{m}; d_{08} = 0.8\text{m}; d_{09} = 0.21\text{m}; d_{10} = 0.77\text{m}; \\ d_{11} = 0.31\text{m}; d_{12} = 0.71\text{m}; d_{13} = 0.81\text{m}; d_{14} = 0.92\text{m}; d_{15} = 0.94\text{m};$$

Usando la ecuación 17 se tiene:

$$T_3 = -(W_{05} * d_{05}) + W_{06} * d_{07} + W_{07} * d_{08} + W_{mr(04)} * d_{10} \\ + W_{01} * d_{12} + W_{02} * d_{13} + W_{03} * d_{14} + W_{04} * d_{15}$$

$$T_3 = -(0.96 * 0.14) + 24.83 * 0.39 + 0.96 * 0.8 + 1.38 * 0.77 + 0.96 \\ * 0.71 + 4.64 * 0.81 + 3.42 * 0.92 + 2.00 * 0.94$$

$$T_3 = 20.85\text{Kg.m}$$

$$T_3 = 204.54\text{N.m}$$

El torque en el EJE 3 tiene un valor de 204.54 N.m, por ende, se usará un reductor CSF-32-100-2UH-SP de la marca *HarmonicDrive* y un motor NEMA 23.

- C. Para obtener el valor del torque en el EJE 2 se usará la ecuación del torque en función de inercia, para los cálculos se usarán la figura 56 y la figura 57 las cuales muestran el diagrama de cuerpo libre y las distancias con respecto al EJE 2.

$$\sum T = I * \alpha \quad (18)$$

Donde:

T: Torque.

I: Momento de Inercia.

α : Aceleración Angular.

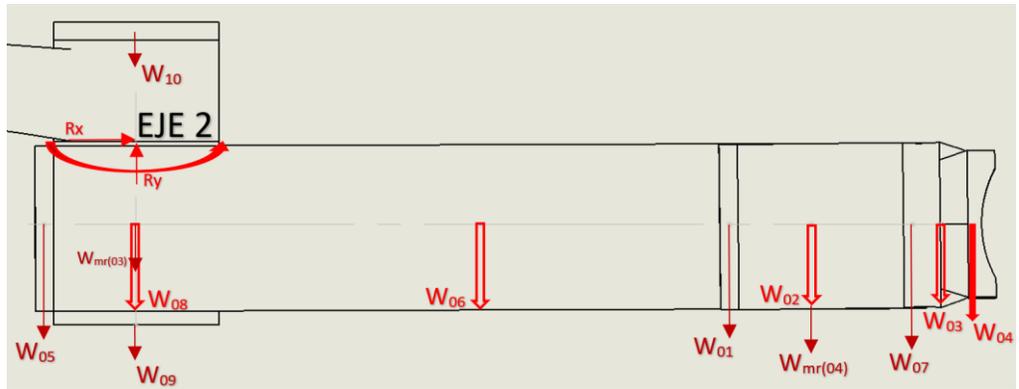


Figura N 56: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 2 (vista perfil izquierdo)

Fuente: Elaboración Propia

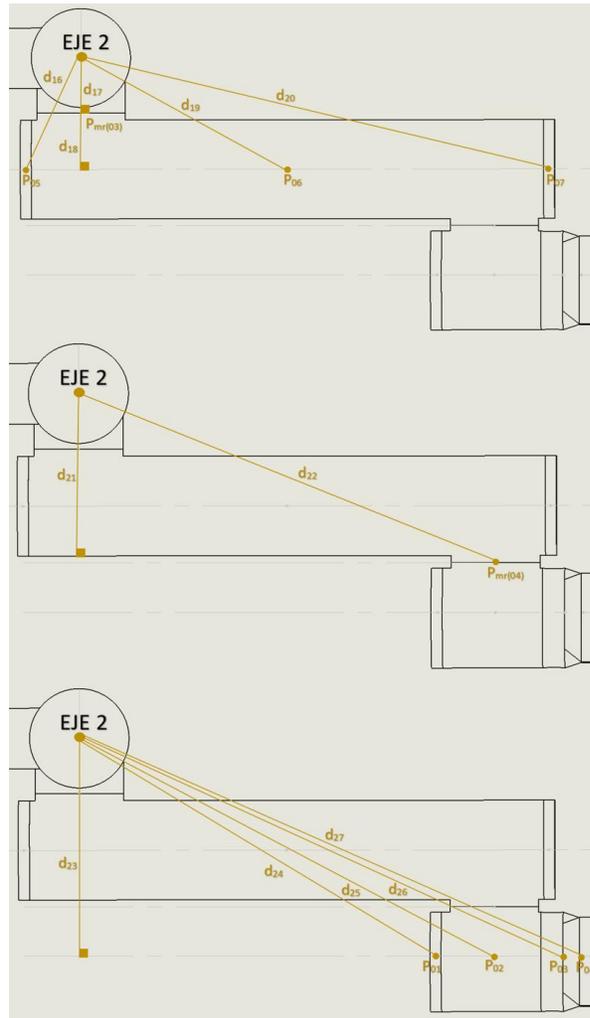


Figura N 57: Diagramas de distancias con respecto al EJE 2 (vista planta)

Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

W_{08} , el peso del primer conector.

W_{09} , el peso de la tapa 4.

W_{10} , el peso de la tapa 5.

$W_{mr(03)}$, el peso del motor 3 junto al reductor.

La masa de cada uno los componentes mencionados anteriormente son:

$W_{08} = 4.64\text{kg}$; $W_{09} = 0.96\text{kg}$; $W_{10} = 0.96\text{kg}$; $W_{mr(03)} = 3.9\text{kg}$

Las distancias con respecto al EJE 2 son las siguientes:

$d_{16} = 0.23\text{m}$; $d_{17} = 0.10\text{m}$; $d_{18} = 0.20\text{m}$; $d_{19} = 0.425\text{m}$; $d_{20} = 0.87\text{m}$; $d_{21} = 0.31\text{m}$;

$d_{22} = 0.8\text{m}$; $d_{23} = 0.41\text{m}$; $d_{24} = 0.76\text{m}$; $d_{25} = 0.85\text{m}$; $d_{26} = 0.96\text{m}$; $d_{27} = 0.98\text{m}$

El momento de Inercia se calcula a partir de la ecuación 19.

$$I = \sum \frac{1}{2} * M_i * R_i^2 \quad (19)$$

Donde:

M_i es la masa.

R_i es la distancia.

En este cálculo no se considerarán los pesos W_{08} , W_{09} y W_{10} debido a que estos coinciden con el eje de giro del EJE 2, por ende, no generarán momento de inercia en el sistema.

$$\begin{aligned} I = & \frac{1}{2} * W_{05} * d_{16}^2 + \frac{1}{2} * W_{mr(03)} * d_{17}^2 + \frac{1}{2} * W_{06} * d_{19}^2 + \frac{1}{2} \\ & * W_{07} * d_{20}^2 + \frac{1}{2} * W_{mr(04)} * d_{22}^2 + \frac{1}{2} * W_{01} \\ & * d_{24}^2 + \frac{1}{2} * W_{02} * d_{25}^2 + \frac{1}{2} * W_{03} * d_{26}^2 + \frac{1}{2} \\ & * W_{04} * d_{27}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I = & \frac{1}{2} * 0.96 * 0.23^2 + \frac{1}{2} * 3.90 * 0.10^2 + \frac{1}{2} * 24.83 * 0.425^2 + \frac{1}{2} \\
& * 0.96 * 0.87^2 + \frac{1}{2} * 1.38 * 0.80^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 0.76^2 \\
& + \frac{1}{2} * 4.64 * 0.85^2 + \frac{1}{2} * 3.42 * 0.96^2 + \frac{1}{2} * 2.00 \\
& * 0.98^2 \\
I = & 7.58 \text{ Kg} * \text{m}^2
\end{aligned}$$

La aceleración angular se calcula mediante la ecuación 20, se considera una velocidad angular de 60 rpm y 1s de tiempo.

$$\omega = 6.28 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha * t \quad (20)$$

$$\alpha = 6.28 \text{ rad/s}^2$$

Reemplazando los datos en la ecuación 18:

$$T2 = 7.58 \text{ Kg} * \text{m}^2 * 6.28 \text{ rad/s}^2$$

$$T2 = 47.60 \text{ N.m}$$

El torque en el EJE 2 tiene un valor de 47.60 N.m, por ende, se usará un reductor CSF-25-50-2UH-SP de la marca *HarmonicDrive* y un motor NEMA 23.

- D. Para hallar el valor del torque en el EJE 1 se usará, de igual forma, la ecuación del torque en función de la inercia, para los cálculos se usarán la figura 58 y la figura 59 las cuales muestran el diagrama de cuerpo libre y las distancias con respecto al EJE 1

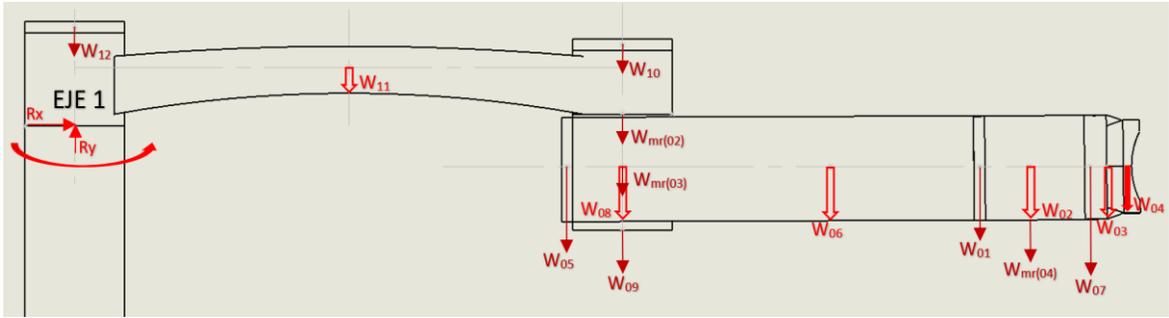


Figura N 58: Diagrama de cuerpo libre para el EJE 1 (vista perfil izquierdo)

Fuente: Elaboración Propia

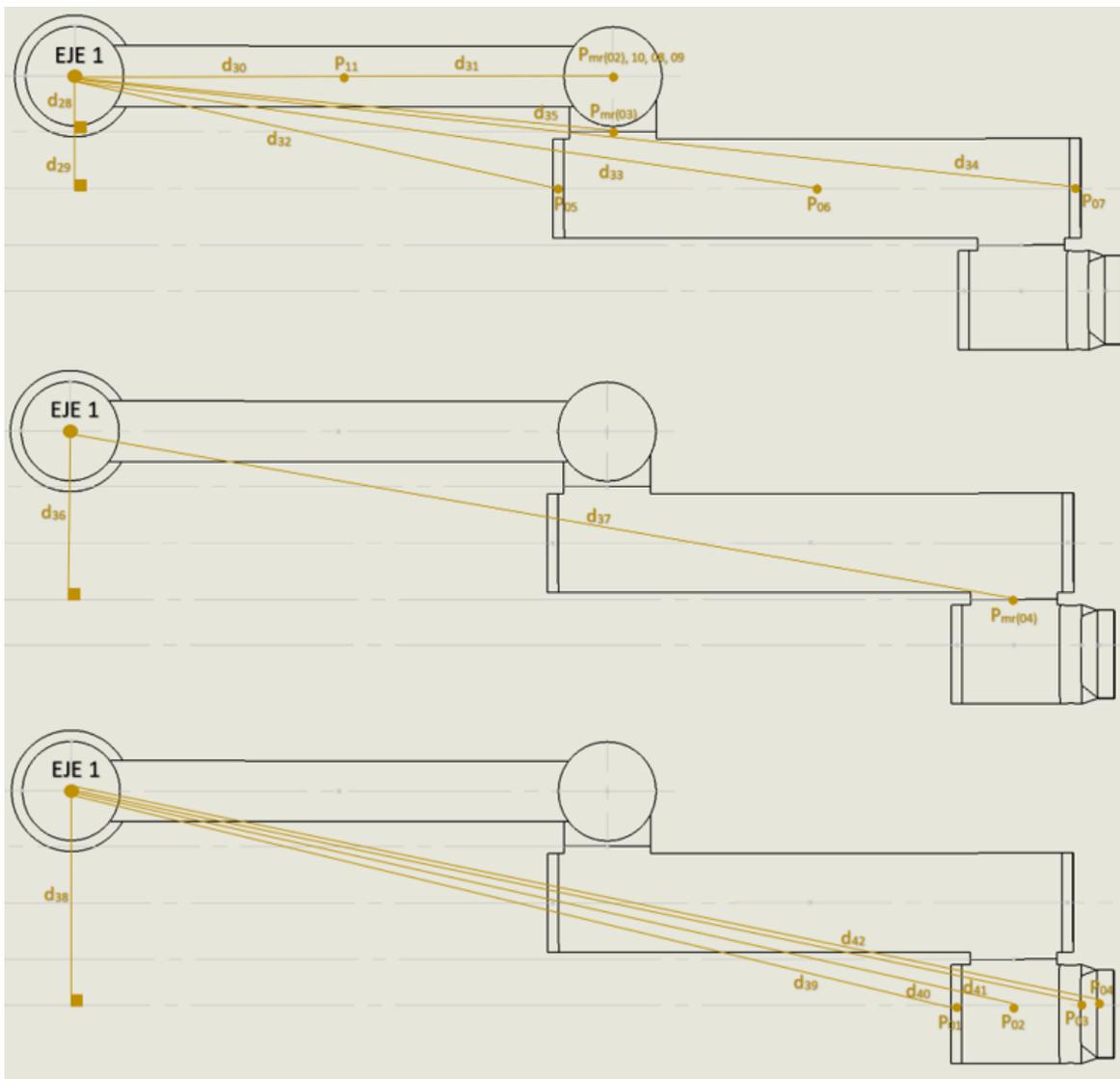


Figura N 59: Diagramas de distancias con respecto al EJE 1 (vista planta)

Fuente: Elaboración Propia.

Donde:

$W_{mr(02)}$, el peso del motor 2 junto al reductor.

W_{11} , el peso del eslabón 1

W_{12} , el peso de la tapa 6.

La masa de cada uno los componentes mencionados anteriormente son:

$$W_{mr(02)} = 2.20\text{kg}; W_{11} = 23.81\text{kg}; W_{12} = 0.96\text{kg}$$

Las distancias con respecto al EJE 1 son las siguientes:

$$d_{28} = 0.10\text{m}; d_{29} = 0.20\text{m}; d_{30} = 0.495\text{m}; d_{31} = 0.99\text{m}; d_{32} = 0.92\text{m};$$

$$d_{33} = 1.39\text{m}; d_{34} = 1.85\text{m}; d_{35} = 1.00\text{m}; d_{36} = 0.306\text{m}; d_{37} = 1.73\text{m};$$

$$d_{38} = 0.406\text{m}; d_{39} = 1.68\text{m}; d_{40} = 1.78\text{m}; d_{41} = 1.90\text{m}; d_{42} = 1.92\text{m}$$

Para el cálculo del torque en el EJE 1 se emplearán las mismas ecuaciones usadas para hallar el torque en el EJE 2.

Para hallar el momento de inercia se empleará la ecuación 19

$$I = \frac{1}{2} * W_{11} * d_{30}^2 + \frac{1}{2} * W_{mr(02)} * d_{31}^2 + \frac{1}{2} * W_{10} * d_{31}^2 + \frac{1}{2} * W_{08} * d_{31}^2 + \frac{1}{2} * W_{09} * d_{31}^2 + \frac{1}{2} * W_{mr(03)} * d_{35}^2 + \frac{1}{2} * W_{05} * d_{32}^2 + \frac{1}{2} * W_{06} * d_{33}^2 + \frac{1}{2} * W_{07} * d_{34}^2 + \frac{1}{2} * W_{mr(04)} * d_{37}^2 + \frac{1}{2} * W_{01} * d_{39}^2 + \frac{1}{2} * W_{02} * d_{40}^2 + \frac{1}{2} * W_{03} * d_{41}^2 + \frac{1}{2} * W_{04} * d_{42}^2$$

$$I = \frac{1}{2} * 23.81 * 0.495^2 + \frac{1}{2} * 2.20 * 0.99^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 0.99^2 + \frac{1}{2} * 4.64 * 0.99^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 0.99^2 + \frac{1}{2} * 3.9 * 1.00^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 0.92^2 + \frac{1}{2} * 24.83 * 1.39^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 1.85^2 + \frac{1}{2} * 1.38 * 1.73^2 + \frac{1}{2} * 0.96 * 1.68^2 + \frac{1}{2} * 4.64 * 1.78^2 + \frac{1}{2} * 3.42 * 1.90^2 + \frac{1}{2} * 2.00 * 1.92^2$$

$$I = 55.83 \text{ Kg} * \text{m}^2$$

Para hallar la aceleración se empleará la ecuación 20, considerando una velocidad angular de 30 rpm y 1s de tiempo.

$$\omega = 3.14 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha * t \quad (20)$$

$$\alpha = 3.14 \text{ rad/s}^2$$

Reemplazando los datos de momento de inercia y la aceleración angular en la ecuación 18:

$$T1 = 55.83 \text{ Kg} * m^2 * 3.14 \text{ rad/s}^2$$

$$T2 = 175.31 \text{ N.m}$$

El torque en el EJE 1 tiene un valor de 175.31 N.m, por ende, se usará un reductor CSF-32-80-2UH-SP de la marca *HarmonicDrive* y un motor NEMA 24.

4.4 Evaluación y selección de sensores

A. Sensor de ultrasonido

Dentro de los factores a considerar para la elección del sensor de ultrasonido se tiene la distancia a la cual se encuentra el objeto a medir, en esta ocasión se está considerando una distancia de 1 metro entre el efector o cabezal de la lámpara de luz y el odontólogo. En adición a ello es importante definir la resolución con la que trabaja el sensor, entendiéndose por resolución a la mínima variación de distancia perceptible por el sensor. Se desea en forma ideal que este valor sea el menor posible, sin embargo, está estrechamente relacionado al rango de medición del sensor por lo que se tomará según las tablas de fabricantes a considerar.

Otro de los aspectos importantes a considerar es el patrón de detección que posee el sensor, el cual se entiende como el rango o espacio en el que el sensor es capaz de detectar un obstáculo u objeto, en relación con la distancia. Esto es observable en los diagramas de patrones que ofrecen los fabricantes, como por ejemplo el

mostrado en la figura 60, donde se aprecia la en un plano semi circular que representa 180 grados de visión con un máximo de 10m de distancia hacia cada extremo, se muestra entonces la forma del patrón de detección marcado por una línea negra, los que nos indica la imagen mostrada es que el sensor puede detectar objetos hasta 5 metros de distancia en forma perpendicular, reduciéndose esta capacidad hasta 1.5 metros en un rango de ± 35 grados.

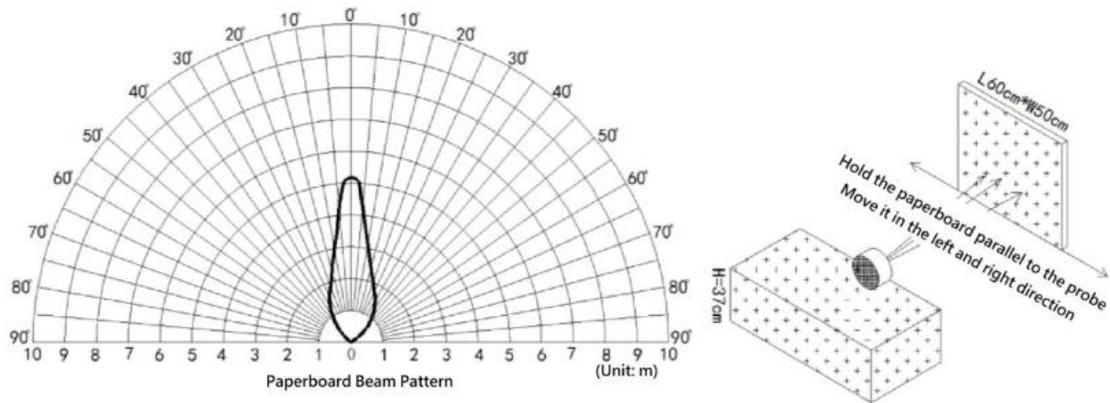


Figura N 60: Patrón de detección de sensor A02YYUW

Fuente: DFRobot (2022)

Considerando lo anteriormente mencionado se dispone de una serie de sensores existentes en el mercado según las características mencionadas, los sensores considerados para esta aplicación son el HC-SR04, MB1414, MB1614 y MB1000. Se está considerando el sensor HC-SR04 dentro de la comparativa debido a que este sensor es comúnmente utilizado en aplicaciones donde se requiera sensores de ultrasonido, siendo un punto de referencia y de comparación con los demás sensores propuestos.

Tabla N° 13

Comparación entre modelos de sensores de ultrasonido

	HC-SR04	MB1000	MB1414	MB1614
Rango de detección (máximo)	400 cm	645 cm	650cm	500 cm
Resolución	0.3 cm	2.54 cm	1 mm	1 mm
Dimensiones	45 mm x 20 mm x 15 mm	19.9 mm x 22.1 mm x 15.5 mm	21.92 mm x 22.56 mm x 15.49 mm	38.05 mm x 22.23 mm x 13.97 mm
Frecuencia de operación	40 KHz	42 KHz	42 KHz	-
características especiales	-	-	-	Filtro 2Hz

Fuente: Elaboración propia

Por lo mostrado anteriormente, se procede a elegir el sensor MB1614 debido a las siguientes consideraciones:

- El modelo MB1614 posee el rango de medición de medio metro, lo que permite evitar el sobredimensionamiento consiguiendo una distancia de medición decente para la aplicación requerida.
- El modelo cuenta con una resolución de 1mm, lo que permite precisión a la hora de detectar el movimiento del personal médico.
- Si bien las dimensiones son superiores a las presentadas por los modelos comparados, estas se encuentran dentro del límite permitido según el diseño mecánico de la lámpara.
- Posee como característica especial el hecho de contar con un filtro de 2Hz, diferenciándose del resto de opciones, y permitiendo que la información obtenida sea la idónea.
- Si bien no posee el patrón de detección más amplio de los modelos revisados, su utilización en conjunto con los demás sensores a incluir en el diseño propuesto permite compensar dicha necesidad.

B. Sensor infrarrojo

Para la selección del sensor o grupo de sensores infrarrojos que serán utilizados en la tesis se determinó primero la forma en la cual serían aplicados, es decir, la solución. Esta consiste en crear un arreglo de sensores que funcione como una malla, la cual se encuentra por delante de la lámpara y detecta cualquier obstrucción que se presente por delante. Una analogía a la forma mostrada es un tablero de ajedrez donde la lámpara se encuentra en medio del tablero y cada obstáculo es detectado como una pieza que ingresa desde uno de los laterales del tablero.

En base a lo mencionado anteriormente, se deben de tener ciertas consideraciones para la elección del sensor, siendo una de las más importantes el hecho que el sensor se encontrará posicionado cerca del foco de la lámpara, por lo que debe de ser capaz de operar con perturbaciones lumínicas. Adicionalmente el rango de temperatura a censar y la mínima perturbación detectable. Por lo tanto, se toman los siguientes sensores infrarrojos térmicos D6T-44L-06, AMG88, MLX90640 y MLX90641.

Tabla N° 14

Comparación entre modelos de sensores IR térmicos

Modelo	MLX90641	MLX90640	D6T-44L-06	AMG8853 Grid Eye
Resolución	16x12	32x24	4x4	8x8
Tasa de refresco	4 Hz	64 Hz	no especifica	10 Hz
Campo de visión	110° x 75°	110° x 75°	44.2° x 45.7°	60° x 60°
Consumo	39.6 mW	66 mW	25 mW	14.85 mW
Costo	\$41	\$38	\$24	\$18

Fuente: Elaboración propia

Según lo mostrado en el anterior cuadro, se seleccionó el sensor AMG8853 debido a que este sensor reúne las características mínimas para la aplicación seleccionada, si bien las demás opciones disponibles ofrecen un mejor desempeño, no se requiere un gran ángulo o campo de visión, y para el diseño

del sistema de posicionamiento autónomo, sobredimensionar el espacio a censar sería contraproducente. En adición a ello el modelo escogido posee un diseño más compacto y pequeño, lo que favorece al diseño de la lámpara como tal.

C. Sensor de fuerza

La función del sensor de fuerza para el presente diseño comprende en detectar la presencia del paciente, quien se encuentra recostado sobre el sillón dental. Esto lo realizará mediante un arreglo lineal de sensores de fuerza donde el último sensor contando desde la parte inferior a la superior determina la posición de la cabeza del paciente y, por lo tanto, hacia donde se debe direccionar por defecto la lámpara según la altura del paciente.

Por lo mencionado y por la simpleza de estos sensores simplemente se tomará un sensor de fuerza Interlink 402, el cual se calibra mediante el código, para que a cierto nivel de presión se considere que la persona está posicionada sobre el mismo.

4.5 Selección del controlador e integración con ROS

En lo que respecta a la selección del controlador, mencionado en el título de este segmento, se intuye del propio título que se consideró para este diseño el RaspberryPi, los motivos detrás de esta elección se deben a que este tipo de controladores, a diferencia de sus contrincantes más cercanos como lo es Arduino, ofrecen un mayor poder computacional lo que permite su aplicación en tareas que requieran un alto poder de procesamiento. Otro punto fuerte que poseen los controladores RaspberryPi es que estos poseen sistemas basados en Linux, lo que permite la instalación de distribuciones basadas en Ubuntu la cual se integra con los sistemas de control de robots más avanzados como lo es ROS, ampliando las capacidades dicho controlador.

Si bien lo mencionado en el comentario anterior es la base de la elección del controlador, sabemos que en el mercado existe una gran variedad de modelos y versiones de RaspberryPi, por lo que el siguiente paso a realizar es determinar cuál de las opciones disponibles es aquella que se ha de incluir en el presente diseño. Para

ello se van a considerar aspectos como velocidad de CPU, cantidad de memoria interna, compatibilidad a nivel de puertos de entrada y salida, y demás características físicas y eléctricas propias del dispositivo.

Se dispone a continuación de un cuadro comparativo de los modelos que se consideraron candidatos para la presente aplicación:

Tabla N° 15
Comparación entre modelos de RaspberryPi

Modelo	Raspberry Pi 4 B	Raspberry Pi 3 B+	Raspberry Pi Zero 2 W
núcleo	Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit	Cortex-A53 64-bit	Cortex-A53 64-bit
Nro. núcleos	4	4	4
Velocidad	1.5 GHz	1.4 GHz	1 GHz
Procesador	1 GB, 2 GB, 4 GB, 8GB LPDDR4	1 GB DDR2	512 MB
RAM	OK	OK	OK
I2C	56.5 mm x 85.6 mm x 11 mm	56.5 mm x 85.6 mm x 17 mm	30 mm x 65 mm x 13 mm
Dimensiones	46 g	45	16 g
Peso	75 USD	35 USD	15 USD
Precio			

Fuente: Elaboración propia

Para la elección del modelo ideal se tiene en cuenta que el diseño propuesto se generó utilizando como hardware una laptop cuyas especificaciones son:

- Intel I5 8 núcleos 2.50 GHz
- Memoria RAM 16 GB

Por este motivo se considera el Raspberry Pi 4 como modelo inicial para el planteamiento del diseño, sin embargo, teniendo como consideración que el modelo Raspberry Pi Zero 2W tiene mejores especificaciones a nivel físico (peso, dimensiones) que en caso de soportar la carga operacional de la propuesta se convertiría este modelo en el idóneo.

4.6 Esquema de conexión de los sensores

En este bloque se muestra un vistazo de la conexión a realizar de implementarse físicamente el diseño mencionado. A continuación, se observa en la imagen la estructura de conexión de los sensores principales como son el GridEye o sensor infrarrojo y los sensores de ultrasonido utilizados.

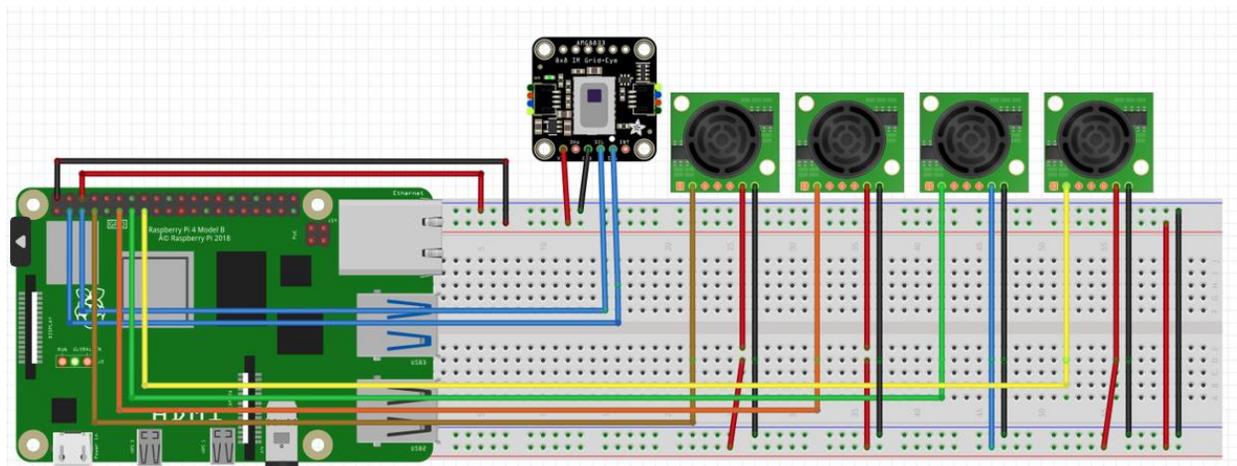


Figura N 61: Conexión de procesador y sensores a nivel visual

Fuente: Elaboración propia

Se considera dentro de las conexiones que para el caso particular del sensor infrarrojo este se apoya de los pines SDA (GPIO2) y SCL (GPIO3) los cuales son capaces de gestionar la información entregada por el sensor. Para los casos de los sensores ultrasonido estos son alimentados a través de la energía entregada por el Raspberry Pi4, y el pin de data van conectados a los pines regulares. A continuación, se observa el diagrama del circuito electrónico.

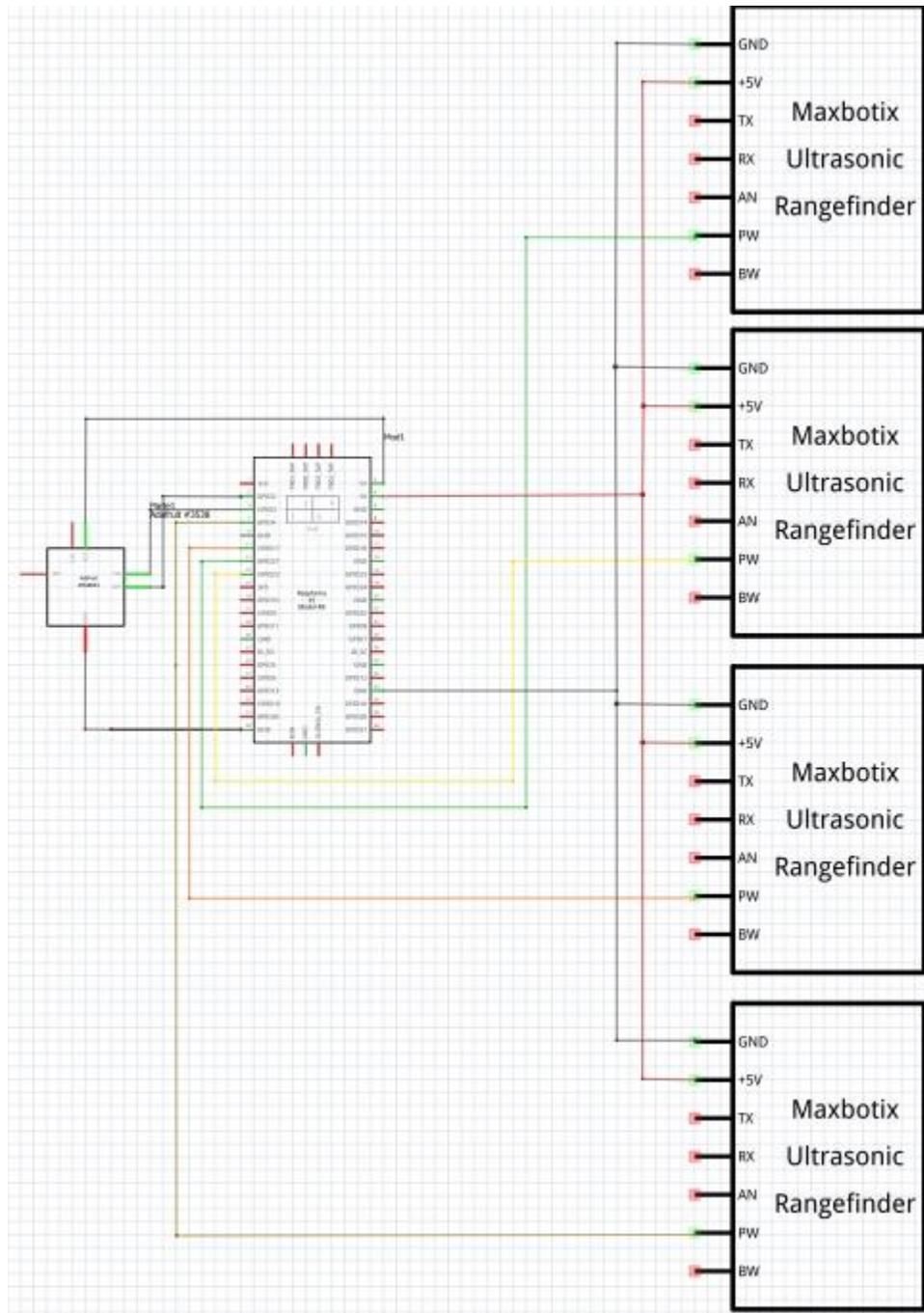


Figura N 62: Diagrama electrónico conexión entre procesador y sensores

Fuente: Elaboración propia

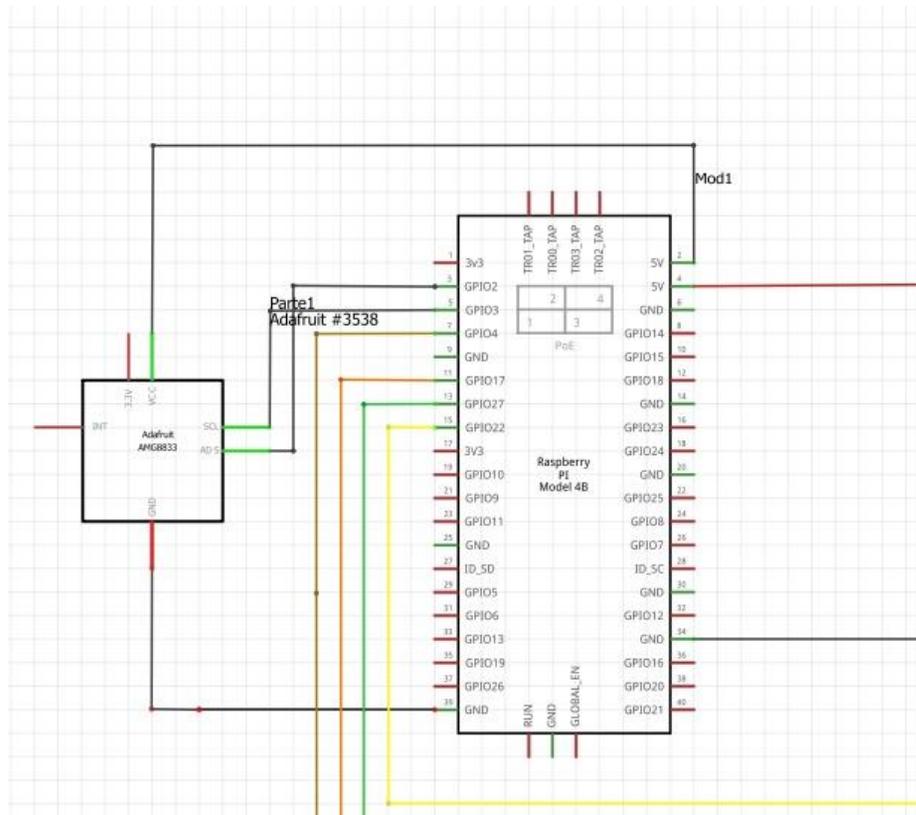


Figura N 63: Diagrama electrónico acercamiento a procesador

Fuente: Elaboración propia

4.7 Desarrollo de algoritmo de detección de obstáculos

En esta sección se detalla el proceso para determinar el algoritmo que registrará el comportamiento del sistema autónomo de evasión de obstáculos el cual contará la lámpara de sillón dental.

Es necesario entender el comportamiento general del sistema para poder desarrollar en forma precisa cada función a utilizar, por dicha razón se generó el siguiente diagrama que ilustra los pasos que realizará el robot.

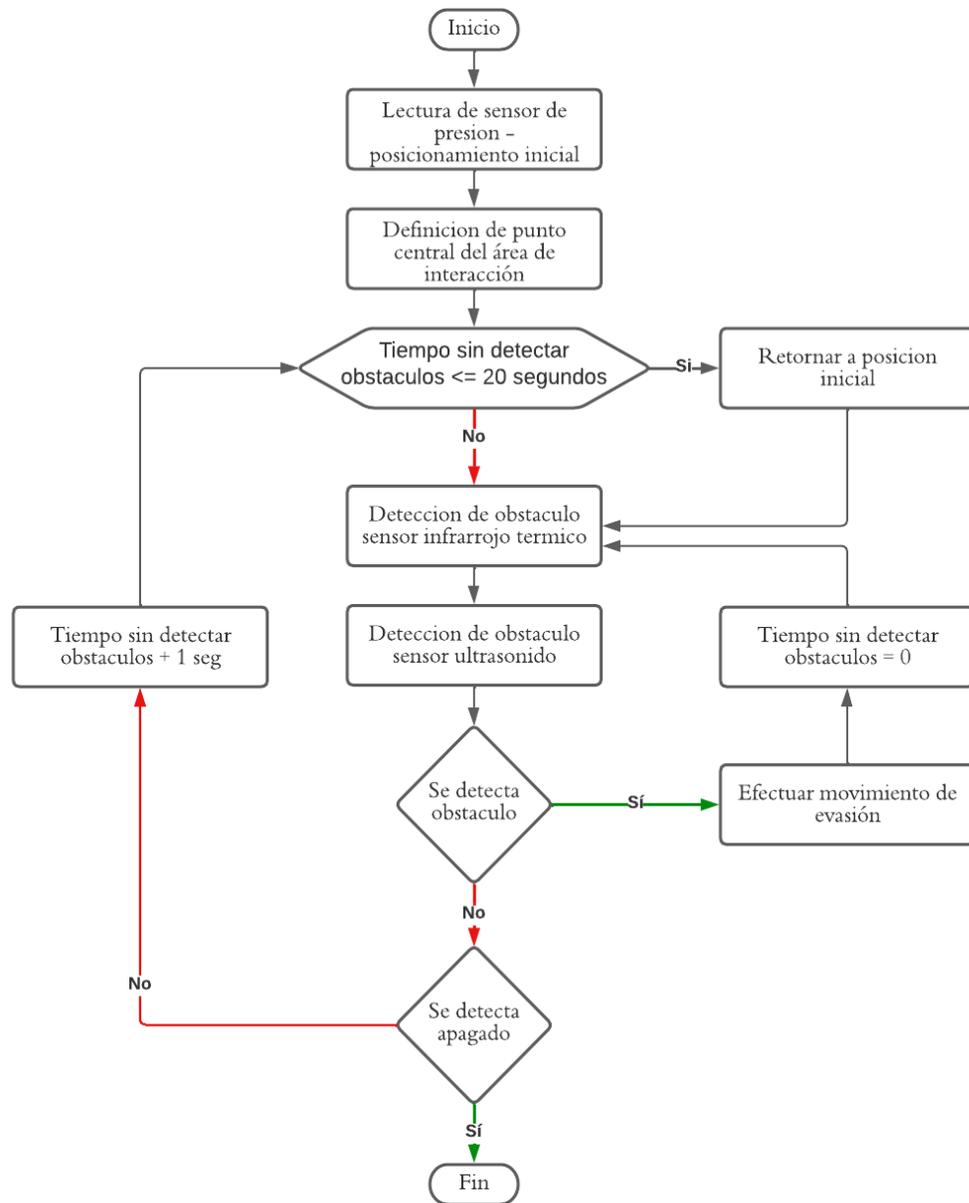


Figura N 64: Diagrama de flujo de funcionamiento del algoritmo de evasión autónoma

Fuente: Elaboración propia.

Si bien la anterior imagen describe el comportamiento general sobre el cual se rige el sistema autónomo, cada uno de los procesos (llamados nodos) posee su propia lógica de funcionamiento, el cual se detalla en las siguientes secciones:

Función punto_inicial

Esta función se ejecuta cada vez que inicia el funcionamiento del sistema autónomo, lo que realiza es reconocer los obtenidos por el sensor de presión o fuerza, según el cual tomará una de las posiciones iniciales las cuales se encuentran predefinidas en el sistema. Además, tiene como función el publicar dicha posición para que pueda ser utilizado por los demás nodos que conforman el programa.

Función contadora_obstaculo

Esta función es el punto de retorno para las demás funciones que comprenden el sistema, operando como un contador que determinará si el valor medido ha superado el tiempo sin detectar obstáculos mínimo definido en el código, invocando a la función “retornar_origen”. En caso no se cumpla dicha condición continuará invocando a las funciones relacionadas a los sensores propiamente.

Función retornar_origen

En esta parte se realiza una comparación de la posición actual con la posición origen del sistema, con lo que se calcula los movimientos que deberán realizar los actuadores para direccionar la lámpara a su punto inicial. Los valores de entrada de esta función comprenden la posición inicial y la posición actual del efector final (lámpara)

Función Sensor_infrarrojo

Esta función realiza la comunicación con el sensor infrarrojo y tiene como información de salida la existencia o no de algún obstáculo, así como la posición desde la cual proviene dicho obstáculo, esto es enviado posteriormente a la función encargada de ejecutar el movimiento de evasión.

Función Sensor_ultrasonido

Similar a la operación anterior mencionada, esta se encarga de detectar los posibles obstáculos a través de los sensores de ultrasonido, indicando la existencia de estos y la ubicación desde la cual se aproximan al sistema.

Función evasion_obstaculo

Esta función es el corazón de la operación del sistema autónomo, ya que contiene la lógica que relaciona al obstáculo con la posición del efector. Esto lo hace mediante el cálculo de la distancia entre ambos objetos en el plano y el ángulo de inclinación. Utilizando esta diferencia ordena a los actuadores o motores que ejecuten el movimiento del sistema hasta dejar de percibir algún obstáculo en su rango de medición.

Las funciones antes mencionadas comprenden la serie acciones que realiza el sistema autónomo de evasión de obstáculos, es aquí donde ROS entra en juego, ya que este ambiente o entorno de trabajo es constantemente alimentado por su comunidad en lo que respecta a los nodos, que son las funciones ya codificadas en algún lenguaje de programación, poseen los tópicos, que son los tipos de mensajes que se transmiten, lo que normalmente consideraríamos para el envío y recepción de variables entre cada función y tiene un sistema maestro que se encarga de relacionar todas las partes para su operación conjunta.

La aplicación de ROS soluciona 2 grandes aspectos que son la necesidad de generar código nuevo para cada proceso, siendo solo necesario cuando se ha de aplicar alguna función con un uso muy específico, y un segundo aspecto que es la capacidad de armar el funcionamiento como si se tratara de un rompecabezas, reduciendo la programación en un solo bloque, como suelen suceder en muchos de los proyectos que se realizan por ejemplo en plataformas como el IDE de Arduino, donde un error en un punto del código puede hacer que falle el funcionamiento del robot en su totalidad, retrasando así el diseño y prueba del mismo.

El siguiente paso por realizar es la simulación de la estructura brazo robótico que comprende el sistema, para lo cual se requiere preparar el sistema que se encargará de esta tarea. Para este punto se está contando con una computadora que posee

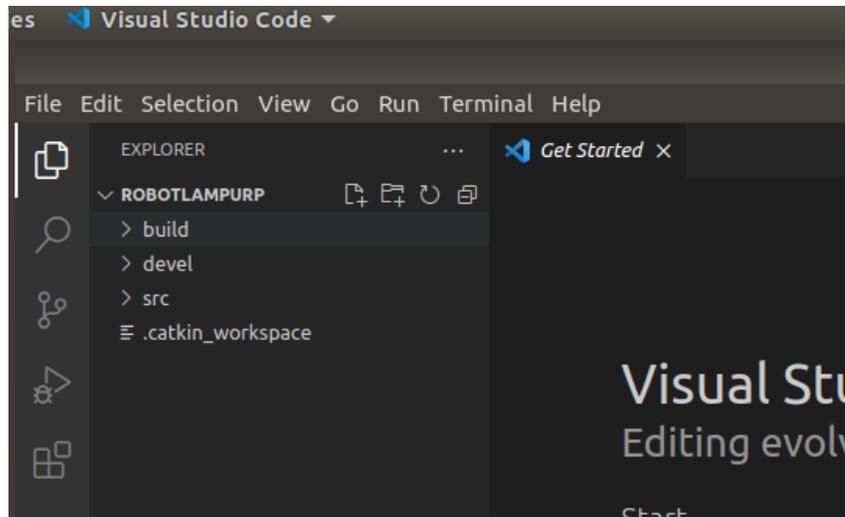


Figura N 66: Entorno Visual Studio Code visualizando carpetas

Fuente: Elaboración Propia

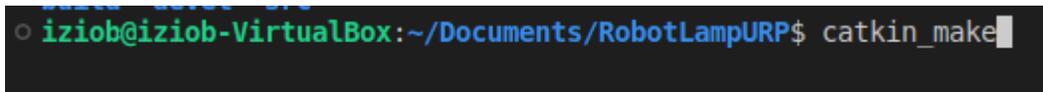


Figura N 67: Sentencia "catkin_make" utilizada para compilación del proyecto

Fuente: Elaboración Propia

Creamos entonces la estructura de carpetas que se muestra en la siguiente figura:

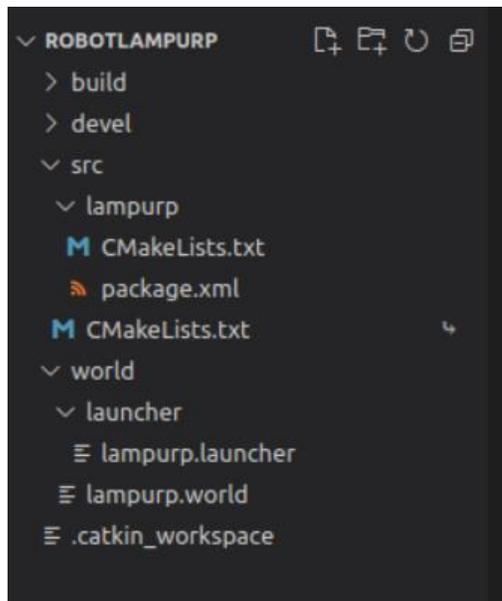


Figura N 68: Estructura de carpetas y repositorios para la simulación

Fuente: Elaboración Propia

Dentro del mismo ingresamos la configuración del lanzador, el cual se encargará de cargar las configuraciones básicas que permiten que se inicialice la simulación:

```
lampurp.launcher
world > launcher > lampurp.launcher
1 <launch>
2   <arg name="paused" default="true"/>
3   <arg name="use_sim_time" default="true"/>
4   <arg name="gui" default="true"/>
5   <arg name="headless" default="false"/>
6   <arg name="debug" default="false"/>
7   <include file="$(find gazebo_ros)/launch/empty_world.launch">
8     <arg name="world_name" value="$(find lampurp)/world/lampurp.w
9     <arg name="verbose" value="true"/>
10    <arg name="debug" value="$(arg debug)"/>
11    <arg name="gui" value="$(arg gui)"/>
12    <arg name="paused" value="$(arg paused)"/>
13    <arg name="use_sim_time" value="$(arg use_sim_time)"/>
14    <arg name="headless" value="$(arg headless)"/>
15  </include>
16 </launch>
17
```

Figura N 69: Configuración del archivo lanzador

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente también configuramos el archivo con los datos del mundo, esto se hace con el fin de que la simulación a realizar se encuentre en un entorno con las condiciones físicas lo más cercano a el mundo real, es por ello que los parámetros contenidos dentro de la configuración mencionan la gravedad, el campo magnético y otros más. Esto puede ser controlado para simulaciones de mayor precisión.

```
> lampurp > world > lampurp.world
1 <sdf version='1.6'>
2   <world name='default'>
3
4   <include>
5     <uri>model://sun</uri>
6   </include>
7
8
9   <gravity>0 0 -9.8</gravity>
10  <magnetic_field>6e-06 2.3e-05 -4.2e-05</magnetic_field>
11  <atmosphere type='adiabatic'/>
12  <physics name='default_physics' default='0' type='ode'>
13    <max_step_size>0.001</max_step_size>
14    <real_time_factor>1</real_time_factor>
15    <real_time_update_rate>1000</real_time_update_rate>
16  </physics>
```

Figura N 70: Configuración del archivo de mundo o entorno

Fuente: Elaboración Propia

Una vez generado el entorno, lo siguiente es la generación de un modelo para la simulación, para lo cual nos basamos en la estructura diseñada, tomando en cuenta las medidas se crea una representación del diseño, para ello se utiliza las siguientes configuraciones:

```
</link>
<link name='link_3'>
  <inertial>
    <mass>1</mass>
    <inertia>
      <ixx>0.166667</ixx>
      <ixy>0</ixy>
      <ixz>0</ixz>
      <iyy>0.166667</iyy>
      <iyz>0</iyz>
      <izz>0.166667</izz>
    </inertia>
    <pose frame=''>0 0 0 -0 0</pose>
  </inertial>
  <pose frame=''>0.605 0 1.93 0 -0 0</pose>
  <gravity>1</gravity>
  <self_collide>0</self_collide>
  <kinematic>0</kinematic>
  <enable_wind>0</enable_wind>
  <visual name='visual'>
    <pose frame=''>0 0 0 0 -0 0</pose>
    <geometry>
      <box>
        <size>1.03 0.14 0.11</size>
      </box>
    </geometry>
  </visual>
</link>
```

Figura N 71: Declaración de eslabones del objeto de simulación

Fuente: Elaboración Propia

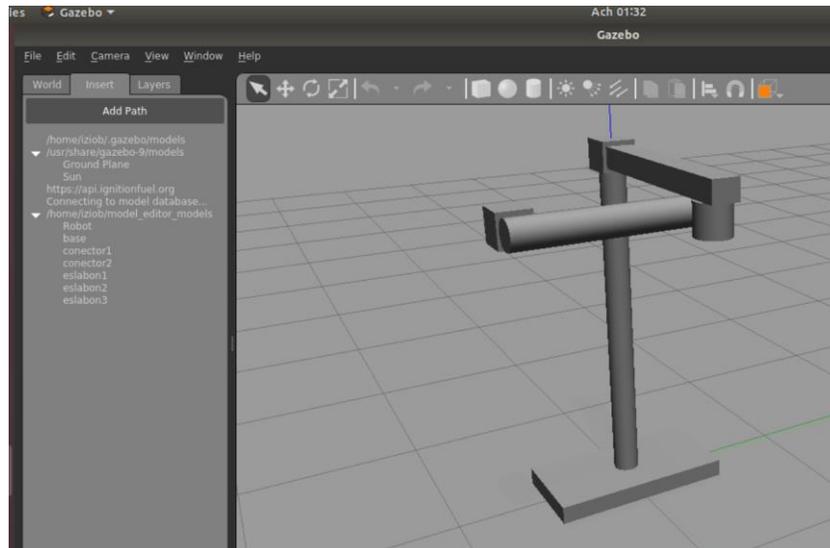


Figura N 72: Representación 3D del modelo en la simulación

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V: CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1 Análisis de Resultados de la etapa Mecánica y de accionamiento

Cuando se empezó el diseño de la estructura mecánica del sistema, se había considerado utilizar el acero al carbono como material para las piezas de la lámpara de luz oral, ya que, el material que se utiliza para elaborar las partes de las unidades dentales comunes es el acero al carbono. Sin embargo, al realizar los cálculos del diseño mecánico, se observó que, al usar el acero al carbono como material para las piezas del sistema, estas serían demasiado pesadas para los motores, lo cual provocaría seleccionar otro tipo de motores con un torque mayor, por esta razón se evaluó utilizar otro material que tenga una densidad menor pero que sea capaz de soportar las fuerzas de flexión y carga que se aplican al sistema. Luego de realizar distintas comparaciones, se decidió utilizar el aluminio 6061 debido a su baja densidad y su precio no tan elevado. En la figura 70 se puede observar la diferencia de masa que tiene el eslabón 1 al usar acero al carbono y aluminio 6061.

Propiedades de masa de Estructura_Eslabon_1_FINAL_Acero al carbono	Propiedades de masa de Estructura_Eslabon_1_FINAL
Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --	Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --
Densidad = 7800.00000 kilogramos por metro cúbico	Densidad = 2700.00000 kilogramos por metro cúbico
Masa = 68.78058 kilogramos	Masa = 23.80866 kilogramos
Volumen = 0.00882 metros cúbicos	Volumen = 0.00882 metros cúbicos
Área de superficie = 0.81244 metros cuadrados	Área de superficie = 0.81244 metros cuadrados
Centro de masa: (metros) X = 0.40225 Y = 0.06572 Z = -0.04500	Centro de masa: (metros) X = 0.40225 Y = 0.06572 Z = -0.04500
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Medido desde el centro de masa. I _x = (1.00000, -0.00234, 0.00000) I _y = (0.00000, 0.00000, -1.00000) I _z = (0.00234, 1.00000, 0.00000) Px = 0.20531 Py = 8.11743 Pz = 8.16463	Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Medido desde el centro de masa. I _x = (1.00000, -0.00234, 0.00000) I _y = (0.00000, 0.00000, -1.00000) I _z = (0.00234, 1.00000, 0.00000) Px = 0.07107 Py = 2.80988 Pz = 2.82622
Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados. L _{xx} = 0.20535 L _{xy} = -0.01863 L _{xz} = 0.00000 L _{yx} = -0.01863 L _{yy} = 8.16458 L _{yz} = 0.00000 L _{zx} = 0.00000 L _{zy} = 0.00000 L _{zz} = 8.11743	Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados. L _{xx} = 0.07108 L _{xy} = -0.00645 L _{xz} = 0.00000 L _{yx} = -0.00645 L _{yy} = 2.82620 L _{yz} = 0.00000 L _{zx} = 0.00000 L _{zy} = 0.00000 L _{zz} = 2.80988
Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Medido desde el sistema de coordenadas de salida. I _{xx} = 0.64173 I _{xy} = 1.79973 I _{xz} = -1.24502 I _{yx} = 1.79973 I _{yy} = 19.43307 I _{yz} = -0.20342 I _{zx} = -1.24502 I _{zy} = -0.20342 I _{zz} = 19.54373	Momentos de inercia: (kilogramos * metros cuadrados) Medido desde el sistema de coordenadas de salida. I _{xx} = 0.22214 I _{xy} = 0.62298 I _{xz} = -0.43097 I _{yx} = 0.62298 I _{yy} = 6.72683 I _{yz} = -0.07041 I _{zx} = -0.43097 I _{zy} = -0.07041 I _{zz} = 6.76514

Figura N 73: Características del eslabón 1, a) Eslabón 1 con acero al carbono b) Eslabón 1 con aluminio 6061

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la figura 70 el peso del eslabón 1 reduce en un 34.61% al usar el aluminio 6061, es por ello que se decidió usar este material para todas las piezas del sistema.

5.2 Etapa de simulación

Para la etapa de software se consideró la herramienta ROS como un soporte para el análisis de código, así como los sensores. Esta herramienta se encuentra desarrollada y es compatible en forma nativa con sistemas basados en Linux, sin embargo, se intentó utilizar las herramientas que Microsoft ofrece en su sistema operativo para la instalación de un subsistema compatible con Linux. Hechas estas pruebas se obtuvieron errores a la hora de ejecutar los códigos o compilar los paquetes, lo que indica que este método aun no es totalmente funcional, debiendo optar por una instalación pura de alguna distribución de Linux para la correcta utilización de esta herramienta y su integración con sistemas RaspberryPi.

Frente a lo mencionado se optó por la utilización de una máquina virtual donde se cargó el sistema operativo requerido, mediante este método se pudo generar la simulación que permitiría la operación de los sensores.

Mediante dicha simulación se pudo validar el funcionamiento conjunto de los sensores según la propuesta confirmando la factibilidad de la idea de diseño original. Se determinó que la herramienta ROS si bien brinda una gran versatilidad al momento de diseñar puesto que brinda facilidades respecto a código como simulación, se debe tener sumo cuidado ya que existen diversos errores en compatibilidad con las versiones del software, lo que aumenta su complejidad, además su uso efectivo requiere de un nivel considerable de preparación.

CONCLUSIONES

1. Se pudo diseñar una estructura mecánica de para la lámpara de luz oral simulado en el software Solidworks usando el material aluminio 6061, capaz de mantenerse estable junto al sillón dental sin influir en el trabajo del odontólogo.
2. Se pudo determinar el sistema de suministro energético y diseñar un sistema electrónico que permita la movilidad de la lámpara de luz oral de manera precisa.
3. Se pudo desarrollar los algoritmos que, implementados a través de Robotic Operating System en Linux, que es el sistema en cual está basado Raspberry Pi, permite la detección de obstáculos y posicionamiento de la lámpara de luz oral.
4. Se pudo determinar en base a los requerimientos del sistema las especificaciones necesarias de los componentes a utilizar, existiendo alternativas comerciales que se ajusten a la solución.

RECOMENDACIONES

1. Este diseño de ser implementado disminuirá el riesgo de contagios en los consultorios dentales, sin embargo, se recomienda realizar pruebas de funcionamiento antes de su utilización en el campo real.
2. Se recomienda usar el sistema operativo Linux debido a que es un sistema de código abierto, lo que permite una alta flexibilidad para los usuarios que deseen implementar proyectos o trabajos de investigación en el programa Robotic Operating System, puesto que, este no es compatible en forma nativa con los sistemas operativos convencionales, requiriendo adecuaciones las cuales implican limitaciones en su uso. En adición a ello se debe tener mucha consideración con la versión a utilizar, puesto que es una herramienta de uso en línea, las librerías y repositorios de las cuales se sirve el aplicativo pueden haber sido eliminados de la web.
3. Se recomienda la especialización o capacitación en el uso de la herramienta Robotic Operating System para un máximo aprovechamiento de las capacidades que está ofrece.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo (2018). *Grado de contaminación cruzada en las unidades dentales de la clínica odontológica de la Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua 2017*. (tesis de pregrado). Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú.
- Acosta, E., & Carpio, G. (2022, 23 de mayo). Evidencia genómica de la transmisión de infecciones en el consultorio dental. *Ciencias Clínicas*. Recuperado de: <https://www.elsevier.es/es-revista-ciencias-clinicas-399-pdf-S1665138316000033>
- Anónimo (2022, 03 de junio). *IR Sensor*. ElectronicsHub. Recuperado de <https://www.electronicshub.org/ir-sensor/#:~:text=An%20infrared%20sensor%20emits%20and,equal%20to%2000K%E2%80%9D>
- Anónimo (2022, 03 de junio). *Technical Explanation for Ultrasonic Sensors*. OMRON. Recuperado de https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/50/ultrasonic_tg_e_1_1.pdf
- Anónimo (2022, 04 de junio). *What is a Force Sensor*. UTMEL Electronic. Recuperado de <https://www.utmel.com/blog/categories/sensors/what-is-a-force-sensor>
- Blanco, M. (2019) Romero, A. (2021) *Estudio de un caso: Impacto de la pandemia COVID-19* (tesis de pregrado). Universidad de Extremadura, España.
- Banerjee, S., Dhingra, A. & Jain, H. (2013). Dental chairs from pas to present... an overview. *Guident*, 6 (2), 78-82. Recuperado de <https://www.guident.net/articles/general/DENTAL-CHAIRS-FROM-PAST-TO-PRESENT...AN-OVERVIEW.html>
- Bairsto, R. (2021). Morrison dental chair. *Br Dent*, 239, 697. doi: 10.1038/s41415-021-3144-3
- Belibasakis, G., Kistler, J., Laheij, A., Soet, J., Välimaa, H. & European Oral Microbiology Workshop (2012). Healthcare-associated viral and bacterial infections in dentistry. *Journal of oral microbiology*. 4. 10.3402/jom.v4i0.17659.

- Benábe, B., Elberfeld, E., Estrada, M., Pérez, E., Sánchez, A. & Serna, M. (2022, 04 de junio). Navegación de robots móviles utilizando algoritmos Bugs extendidos. Recuperado de https://rcs.cic.ipn.mx/2019_148_8/Navegacion%20de%20robots%20movers%20utilizando%20algoritmos%20Bugs%20extendidos.pdf
- Berger, E., Conley, K., Faust, J., Foote, T., Gergey, B., Leibs, J.,... Wheeler, R. (2022, 08 de junio). ROS: an open-source Robot Operating System. Recuperado de <http://robotics.stanford.edu/~ang/papers/icraoss09-ROS.pdf>
- Clínica Universidad de Navarra. (2022). *Enfermedades y tratamientos*. Recuperado de <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos>
- Cravioto, P., Galván, F., Guarneros, D., Pastor, V. y Vázquez, M (2017, 29 de mayo). Varicela y herpes zóster: retos para la salud pública. *Salud pública de México*, 59(6), 1. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/spm/v59n6/0036-3634-spm-59-06-650.pdf>
- Das, D. (2022, 04 de junio). *Interfacing IR Sensor Module with Arduino*. Circuit Digest. Recuperado de <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-ir-sensor-module-with-arduino>
- Eurodent (2022, 12 de junio). *Dabi Atlante personal air*. Eurodent. Recuperado de <https://www.eurodent.com.co/producto/dabi-atlante-personal-air/>
- Fang, J., Han, T., Liu, C., Wang, K. S., & Zhao, j. (2021). Obstacle Avoidance of Multi-Sensor Intelligent Robot Based on Road Sign Detection. *Sensors*, 21(29), 67-77. doi: 10.3390/s21206777.
- Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors*. Doi: 10.1007/978-1-4419-6466-3
- Galtarossa, L. (2018). *Obstacle Avoidance Algorithms for Autonomous Navigation system in Unstructured Indoor areas* (tesis de master). Politecnico Di Torino, Italia.
- Iqbal, J., Mustafa, S. & Zohaib, M. (2022, 08 de junio). A novel goal-oriented strategy for mobile robot navigation without sib-goals constraint. *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg*, 63(1), 106-111. Recuperado

de https://www.researchgate.net/publication/324562768_A_Novel_Goal-Oriented_Strategy_For_Mobile_Robot_Navigation_Without_Sub-Goals_Constraint

Jabonero, J. (2010) *Modelado y análisis de un brazo mecánico*. (tesis pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

Laguna M. (2022). *KenHub*. Berlin, Alemania. Recuperado de <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/dermatomas>

Khamdamov, U. (2022, 08 de junio). Introduction to Microcontrollers. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/340022584_Introduction_to_Microcontrollers

Lillis, G. (2003). *IAGenWeb*. Iowa, EU: Iowa Biographies. Recuperado de <http://iagenweb.org/boards/iowa/biographies/index.cgi?read=33910>

MedlinePlus (2021) *Temas de salud*. Recuperado de <https://medlineplus.gov/spanish/healthtopics.html>

MedlinePlus (2021) *Enciclopedia médica*. Recuperada de <https://medlineplus.gov/spanish/encyclopedia.html>

Ministerio de Salud del Perú. (2020). *Manejo de la atención estomatológica en el contexto de la pandemia por COVID-19* (100). Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2136047/Manejo%20de%20la%20atenci%C3%B3n%20estomatol%C3%B3gica%20en%20el%20contexto%20de%20la%20pandemia%20por%20COVID-19.pdf.pdf>

Minzu, V., Susnea, I. & Vasiliu, G. (2022, 04 de junio). Simple, real-time obstacle avoidance algorithm for mobile robots. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228955195_Simple_real-time_obstacle_avoidance_algorithm_for_mobile_robots#:~:text=The%20simplest%20obstacle%20avoidance%20algorithm,distance%20to%20the%20goal%2C%20then

Mitjans, M. (2014) *Collision avoidance control design* (tesis de pregrado). Escola Tecnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, España.

- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. (2018). *La información de la salud*. Recuperado de **¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**<https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud>
- Nayyar, A. & Vikram, P. (diciembre 2015). Raspberry Pi- A Small, Powerful, Cost Effective and Efficient Form Factor Computer: A Review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/305668622_Raspberry_Pi-A_Small_Powerful_Cost_Effective_and_Efficient_Form_Factor_Computer_A_Review
- Nuon, S. (2022, 04 de junio). *Force Sensing Linear Potenciometer*. ARM MBED. Recuperado de <https://os.mbed.com/components/Force-Sensing-Linear-Potentiometer/>
- Organización Mundial de la Salud (2020). *Organización Mundial de la Salud: Notas descriptivas*. Recuperado de [who.int/es/news-room/fact-sheets](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets)
- Romero, A. (2021) *Estudio de un caso: Impacto de la pandemia COVID-19 en la gestión de una clínica dental privada de Lima, 2021* (tesis de máster). Universidad César Vallejo, Perú.
- Rubin, R. (2020, 18 de junio). COVID-19's Crushing Effects on Medical Practices, Some of Which Might Not Survive. *JAMA Network*. Recuperado de <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2767633>
- Paiva, J. (2019). *Sistema de posicionamiento indoor para el guiado de robots móviles implementado en Robot Operating System (ROS)*. Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Thusu, S., Panesar, S. & Bedi, R. (2012). Patient safety in dentistry – state of play as revealed by a national database of errors. *Br Dent J*, 2012(E3), 213. doi: 10.1038/sj.bdj.2012.669
- Universidad TecMilenio (2017). *Actuadores neumáticos*. California, EU.: Course Hero. Recuperado de <https://os.mbed.com/components/Force-Sensing-Linear-Potentiometer/>

- Volgenant, C. & De Soet, J. (2018). Cross-transmission in the Dental Office: Does This Make You Ill?. *Current Oral Health Reports*, 2018(5), 221-228. doi: 10.1007/s40496-018-0201-3
- Yang, Y. (2020) *Dynamic Obstacle-Avoidance Human-Robot Collaboration System for Industry Robots* (tesis de pregrado). KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia.

ANEXO

Anexo 1: Datasheet Sensor Grid-EYE AMG88

Panasonic Infrared Array Sensor Grid-EYE (AMG88)

Infrared Array Sensor Grid-EYE



High Precision Infrared Array Sensor based on Advanced MEMS Technology

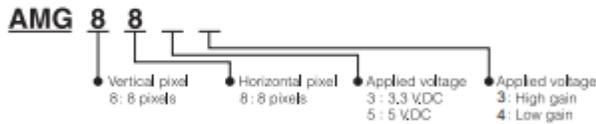
Features

- Temperature detection of two-dimensional area: 8 × 8 (64 pixels)
- Digital output (capability of temperature value output)
- Compact SMD package (adaptively to reflow mounting)
- RoHS compliant

Typical Applications

- High function home appliances (microwaves and air-conditioners)
- Energy saving at office (air-conditioning/lighting control)
- Digital signage
- Automatic doors/elevators

Ordering Information



Types

Product name	Number of pixel	Operating voltage	Amplification factor	Part number
Infrared array sensor Grid-EYE	64 (Vertical 8 × Horizontal 8 Matrix)	3.3 V.DC	High gain	AMG8833
			Low gain	AMG8834
		5.0 V.DC	High gain	AMG8853
			Low gain	AMG8854

Tape and reel package : 1,000 pcs.

Rating

Item	Performance	
	High gain	Low gain
Applied voltage	3.3 V.DC±0.3 V.DC or 5.0 V.DC±0.5 V.DC	
Temperature range of measuring object	0 °C to 80 °C +32 °F to +176 °F	-20 °C to 100 °C -4 °F to +212 °F
Operating temperature range	0 °C to 80 °C +32 °F to +176 °F	-20 °C to 80 °C -4 °F to +176 °F
Storage temperature range	-20 °C to 80 °C -4 °F to +176 °F	-20 °C to 80 °C -4 °F to +176 °F

Panasonic Infrared Array Sensor Grid-EYE (AMG88)

Absolute Maximum Ratings

Item	Absolute maximum ratings	Terminal
Applied voltage	-0.3 V _{DC} to 6.5 V _{DC}	VDD
Input voltage	-0.3 V _{DC} to VDD +0.3 V _{DC}	SCL, SDA, AD_SELECT
Output sink current	-10 mA to 10 mA	INT, SDA
Static electricity (Human body model)	1 kV	All terminals
Static electricity (Machine model)	200 V	All terminals

Characteristics

Item	Performance	
	High gain	Low gain
Temperature accuracy	Typical $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 4.5^{\circ}\text{F}$	Typical $\pm 3.0^{\circ}\text{C}$ $\pm 5.4^{\circ}\text{F}$
Human detection distance ^{*1}	Max. 7 m 22.966 ft	
Viewing angle	Typical 60°	
Optical axis gap	Within Typical $\pm 5.6^{\circ}$	
Current consumption	Typical 4.5 mA (normal mode) Typical 0.2 mA (sleep mode) Typical 0.8 mA (stand-by mode)	
Setup time	Typical 50 ms (Time to enable communication after setup) Typical 15 μ s (Time to stabilize output after setup)	

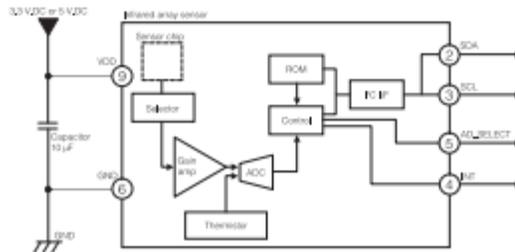
Note: *1 To have more than 4 °C 7.2 °F of temperature difference from background
Detection object size: 700 × 250 mm 27.559 × 9.843 inch (Assume human body size)

Performance

Item	Performance
Number of pixel	64 (Vertical 8 × Horizontal 8 Matrix)
External interface	1 ^W PC (fast mode)
Frame rate	Typical 10 frames/sec or 1 frame/sec
Operating mode ^{*1}	Normal Sleep Stand-by (10 sec or 60 sec intermittence)
Output mode	Temperature output
Calculate mode	No moving average or Twice moving average
Temperature output resolution	0.25 °C
Number of sensor address	2 (1 ^W PC slave address)
Thermistor output temperature range	-20 °C to 80 °C -4 °F to +176 °F
Thermistor output resolution	0.0625 °C

Note: *1 Normal Mode: normal operation mode; Sleep Mode: detection is off (output and data reading not possible); Standby Mode: 1 frame measuring intermittently every 10 or 60 sec.

Internal Circuit



* INT terminal (normally) has same voltage as VDD. When interrupting, same as GND (0V)

Design and specifications are each subject to change without notice. Ask factory for the current technical specifications before purchase and/or use. Should a safety concern arise regarding the product, please be sure to contact us immediately.

HRLV-ShortRange® - EZ™ Series

High Resolution, Precision, Low Voltage Ultrasonic Range Finder

MB1603, MB1604, MB1613, MB1614, MB1623, MB1624, MB1633, MB1634, MB1643, & MB1644⁵



The HRLV-ShortRange-EZ sensor line is the most cost-effective solution for close range applications where precision range-finding, low-voltage operation, and low-cost are needed. This sensor component module allows users of other more costly precision rangefinders to lower the cost of their systems without sacrificing performance.

The HRLV-ShortRange-EZ sensor line provides high accuracy and high resolution ultrasonic proximity detection and ranging in air, in a package less than one cubic inch. This sensor line features 1-mm resolution, target-size and operating-voltage compensation for improved accuracy, superior rejection of outside noise sources, internal speed-of-sound temperature compensation and optional external speed-of-sound temperature compensation. This ultrasonic sensor detects large objects from 1-mm⁶ to 5-meters, senses range to objects from 2-cm to 5-meters. The interface output formats are pulse width, analog voltage, and serial digital in RS232. Factory calibration is standard. ¹See Close Range Operation

Precision Range Sensing

- Range-finding at a fraction of the cost of other precision rangefinders
- Reading-to-reading stability of 1-mm at 1-meter is typical
- Accuracy is factory-matched at 1-meter to 0.2% providing a typical large target accuracy of 1% +/-3-mm for most voltages and uses²
- Calibrated acoustic detection zones allows selection of the part number that matches a specific application
- Compensation for target size variation and operating voltage range
- Standard internal temperature compensation and optional external temperature compensation

Range Outputs

- Pulse width, (1uS/mm)
- Analog Voltage, (5mm resolution)
- RS232 Serial, (at TTL voltage levels)
- TTL Serial

Easy to Use Component Module

- Gracefully handles other ultrasonic sensors³
- Stable and reliable range readings and excellent noise rejection make the sensor easy to use

- Easy to use interface with distance provided in a variety of outputs
- Target size compensation provides greater consistency and accuracy when switching targets
- Sensor automatically handles acoustic noise^{2,3}
- Sensor ignores other acoustic noise sources
- Small and easy to mount
- Calibrated sensor eliminates most sensor to sensor variations
- Very low power ranger, excellent for multiple sensors or battery based systems

General Characteristics

- Low-cost ultrasonic rangefinder
- Size less than 1 cubic inch with easy mounting
- Object proximity detection from 1-mm to 5-meters
- Resolution of 1-mm
- Excellent Mean Time Between Failure (MTBF)
- Triggered operation yields a real-time
- 100mS measurement cycle
- Free run operation uses a 2Hz filter, with 100mS measurement and output cycle
- Actual operating temperature range from -40°C to +65°C, Recommended operating temperature range from -15°C to +65°C, provided proper frost prevention is employed⁴

- Operating voltage from 2.5V to 5.5V⁴
- Nominal current draw of 2.5mA at 3.3V, and 3.5mA at 5V
- Low current draw reduces current drain for battery operation
- Fast first reading after power-up eases battery requirements

Notes:

- ¹ See Close Range Operation
- ² Users are encouraged to evaluate the sensor performance in their application.
- ³ See page 6 for multi-sensor operation.
- ⁴ Please reference page 5 for minimum operating voltage verses temperature information.
- ⁵ Please reference page 16 for part number key.
- ⁶ Small and/or angled targets may have limited detection at distances less than 2cm.

MB1613 & 1614 HRLV-ShortRange-EZ1 Beam Pattern and Uses

The HRLV-ShortRange-EZ1 is an indoor ultrasonic sensor and is a quality, low-cost starting place for a customer not sure of which HRLV-ShortRange-EZ sensor to use. It balances the detection of people and other objects with a narrow beam width.

MB1613-000 MB1614-050

HRLV-ShortRange®-EZ1™ Beam Pattern

Sample results for measured beam pattern are shown on a 30-cm grid. The detection pattern is shown for dowels of varying diameters that are placed in front of the sensor.

A 6.1-mm (0.25-inch) diameter dowel

B 2.54-cm (1-inch) diameter dowel

C 8.89-cm (3.5-inch) diameter dowel

..... Partial Detection

— 5.0V

● 3.3V

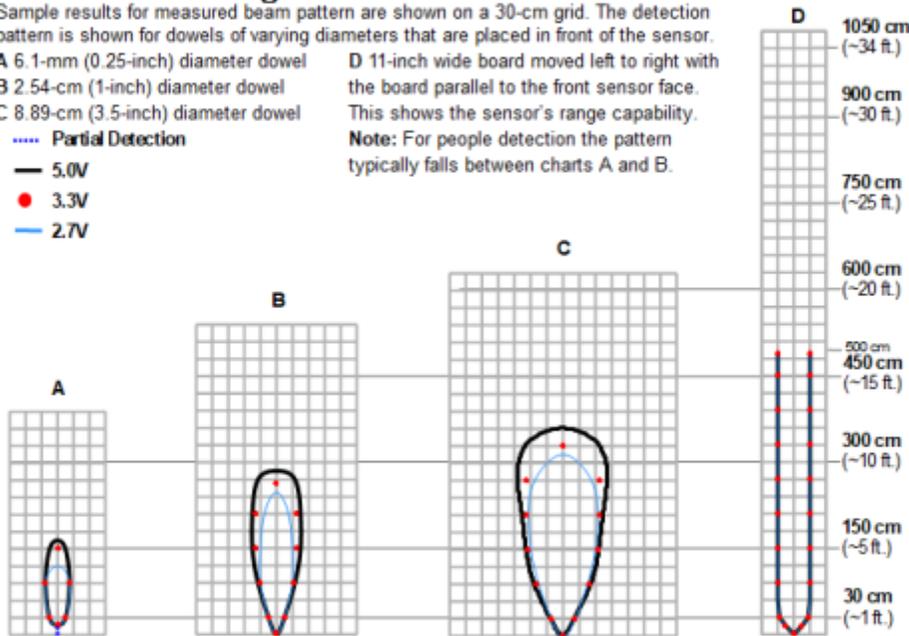
— 2.7V

D 11-inch wide board moved left to right with

the board parallel to the front sensor face.

This shows the sensor's range capability.

Note: For people detection the pattern typically falls between charts A and B.



Beam Characteristics are Approximate

Beam Pattern drawn to a 1:95 scale for easy comparison to our other products.

MB1613 & MB1614 Features and Benefits

- Good balance between people detection and beam pattern width
- Well balanced acoustic sensitivity
- Ignores some small targets
- Detects most targets to long distances
- Wider, balanced beam width
- Sensitive long narrow beam

MB1613 & MB1614 Applications and Uses

- Our most recommended HRLV-ShortRange-EZ Sensor
- People Detection
- Well balanced detection
- Autonomous Navigation



4.1 Power Requirements

The Pi4B requires a good quality USB-C power supply capable of delivering 5V at 3A. If attached downstream USB devices consume less than 500mA, a 5V, 2.5A supply may be used.

5 Peripherals

5.1 GPIO Interface

The Pi4B makes 28 BCM2711 GPIOs available via a standard Raspberry Pi 40-pin header. This header is backwards compatible with all previous Raspberry Pi boards with a 40-way header.

5.1.1 GPIO Pin Assignments

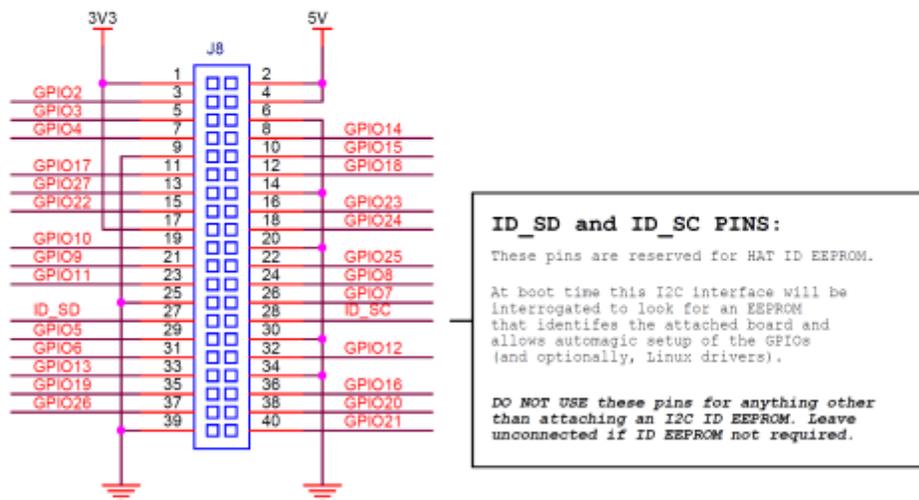


Figure 3: GPIO Connector Pinout

As well as being able to be used as straightforward software controlled input and output (with programmable pulls), GPIO pins can be switched (multiplexed) into various other modes backed by dedicated peripheral blocks such as I2C, UART and SPI.

In addition to the standard peripheral options found on legacy Pis, extra I2C, UART and SPI peripherals have been added to the BCM2711 chip and are available as further mux options on the Pi4. This gives users much more flexibility when attaching add-on hardware as compared to older models.

Anexo 4: Especificaciones de reductores CSF

■ CSF Series

Table 127-1

Size	Ratio	Rated Torque at 2000rpm		Limit for Repeated Peak Torque		Limit for Average Torque		Limit for Momentary Peak Torque		Maximum Input Speed (rpm)		Limit for Average Input Speed (rpm)		Moment of Inertia	
		Nm	kgfm	Nm	kgfm	Nm	kgfm	Nm	kgfm	Oil lubricant	Grease lubricant	Oil lubricant	Grease lubricant	I x 10 ³ kgm ²	J x 10 ³ kgfm ²
14	30	4.0	0.41	9.0	0.92	6.8	0.69	17	1.7	14000	8500	6500	3500	0.033	0.034
	50	5.4	0.55	18	1.8	6.9	0.70	35	3.6						
	80	7.8	0.80	23	2.4	11	1.1	47	4.8						
	100	7.8	0.80	28	2.9	11	1.1	54	5.5						
17	30	8.8	0.90	16	1.6	12	1.2	30	3.1	10000	7300	6500	3500	0.079	0.081
	50	16	1.6	34	3.5	26	2.6	70	7.1						
	80	22	2.2	43	4.4	27	2.7	87	8.9						
	100	24	2.4	54	5.5	39	4.0	108	11						
	120	24	2.4	54	5.5	39	4.0	86	8.8						
20	30	15	1.5	27	2.8	20	2.0	50	5.1	10000	6500	6500	3500	0.193	0.197
	50	25	2.5	56	5.7	34	3.5	98	10						
	80	34	3.5	74	7.5	47	4.8	127	13						
	100	40	4.1	82	8.4	49	5.0	147	15						
	120	40	4.1	87	8.9	49	5.0	147	15						
	160	40	4.1	92	9.4	49	5.0	147	15						
25	30	27	2.8	50	5.1	38	3.9	95	9.7	7500	5600	5600	3500	0.413	0.421
	50	39	4.0	98	10	55	5.6	186	19						
	80	63	6.4	137	14	87	8.9	255	26						
	100	67	6.8	157	16	108	11	284	29						
	120	67	6.8	167	17	108	11	304	31						
32	50	76	7.8	216	22	108	11	382	39	7000	4800	4600	3500	1.69	1.72
	80	118	12	304	31	167	17	568	58						
	100	137	14	333	34	216	22	647	66						
	120	137	14	353	36	216	22	686	70						
	160	137	14	372	38	216	22	686	70						
40	50	137	14	402	41	196	20	686	70	5600	4000	3600	3000	4.50	4.59
	80	206	21	519	53	284	29	980	100						
	100	265	27	568	58	372	38	1080	110						
	120	294	30	617	63	451	46	1180	120						
	160	294	30	647	66	451	46	1180	120						
45	50	176	18	500	51	265	27	950	97	5000	3800	3300	3000	8.68	8.86
	80	313	32	706	72	390	40	1270	130						
	100	353	36	755	77	500	51	1570	160						
	120	402	41	823	84	620	63	1760	180						
	160	402	41	882	90	630	64	1910	195						
50	50	245	25	715	73	350	36	1430	146	4500	3500	3000	2500	12.5	12.8
	80	372	38	941	96	519	53	1860	190						
	100	470	48	980	100	666	68	2060	210						
	120	529	54	1080	110	813	83	2060	210						
	160	529	54	1180	120	843	86	2450	250						
58	50	176	18	1020	104	18	27	1960	200	4000	3000	2700	2200	27.3	27.9
	80	549	56	1480	151	770	79	2450	250						
	100	696	71	1590	162	1060	108	3180	325						
	120	745	76	1720	176	1190	121	3330	340						
	160	745	76	1840	188	1210	123	3430	350						
65	50	245	25	1420	145	360	27	2830	289	3500	2800	2400	1900	46.8	47.8
	80	745	76	2110	215	1040	106	3720	380						
	100	951	97	2300	235	1520	155	4750	485						
	120	951	97	2510	256	1570	160	4750	485						
	160	951	97	2630	268	1570	160	4750	485						

