



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**“DISEÑO DE ROBOT MÓVIL SEMIAUTÓNOMO DE
DESINFECCIÓN MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA
PARA DESACTIVAR AGENTES VIRALES EN ENTORNOS
HOSPITALARIOS.”**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

ADRIÁN RAMIRO GRANJA ROJAS

DIRECTOR: ING. NELSON GUTIÉRREZ, MSc

Quito, Marzo 2021

© Universidad UTE 2021.

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO
PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0202141545
APELLIDO Y NOMBRES:	Granja Rojas Adrián Ramiro
DIRECCIÓN:	Avenida De La Prensa N65-30 y Bellavista Conjunto Lucy
EMAIL:	grar91315@ute.edu.ec adirami_91@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	(02)2535879
TELÉFONO MOVIL:	0982294662

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Diseño de robot móvil semiautónomo de desinfección mediante radiación ultravioleta para desactivar agentes virales en entornos hospitalarios.
AUTOR O AUTORES:	Granja Rojas Adrián Ramijo
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	2021/03/12
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Nelson Gutiérrez, MSc
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	El robot móvil de desinfección es un equipo que permite optimizar el proceso de esterilización de ambientes que requieren un nivel elevado de asepsia utilizando las propiedades germicidas de la radiación ultravioleta. El diseño del sistema abarca dos etapas generales, el autómata móvil y el equipo de desinfección, partiendo de un robot móvil de dos niveles. En el primer nivel se contempla la distribución de motores, ecnoders, baterías, ruedas y controladores de movilidad, en el segundo nivel, o nivel superior, el equipo de desinfección, sensado

	<p>y control de posicionamiento automático. El funcionamiento del sistema contempla que el mismo es un equipo semiautomático, por tanto, requiere un operador para su traslado mediante radiocontrol. El autómata móvil consiste en dos motores de corriente continua acoplados directamente a dos ruedas de tracción y dos puntos de apoyo para el equilibrio. Durante el control manual, el equipo de desinfección no se puede activar, para evitar el contacto directo de seres humanos con la radiación ultravioleta. El equipo de desinfección consiste en "X" lámparas emisoras de radiación UV-C. El posicionamiento del robot móvil de desinfección durante el control automático se divide en "Z" etapas, la primera es el reconocimiento de obstáculos para su traslación, la segunda es el mapeo y la selección automática de coordenadas para el movimiento, la tercera es la rotación del sistema de desinfección sobre su propio eje en puntos específicos del ambiente sentido, la cuarta es el reposicionamiento del autómata móvil y la repetición del ciclo dentro del período de tiempo estimado, considerando que para una superficie "A" se requiere un contacto por "B" segundos a una distancia de "C" metros. Con el sistema automático del robot móvil de desinfección se pretende demostrar que es posible mejorar las condiciones de trabajo del personal hospitalario e incrementar la seguridad de los pacientes alojados en estos centros de atención.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>Robot móvil, Lámpara UV-C, Cinemática, Desinfección, Hospital</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>The mobile disinfection robot is a device that optimizes the sterilization process in environments that require a high level of asepsis, using the germicidal properties of ultraviolet radiation. The design of the system comprises two general stages, the mobile automaton and the disinfection equipment, starting from a two-level mobile robot. The first level includes the distribution of motors, encoders, batteries, wheels and mobility controllers, while the second level, or upper level, includes the disinfection, sensing and</p>

	<p>automatic positioning control equipment. The operation of the system consists of a semi-automatic equipment, therefore, it requires an operator to move it by means of radio control. The mobile automaton consists of two DC motors directly coupled to two drive wheels and two support points for balancing. During manual control, the disinfection equipment cannot be activated, to avoid direct human contact with ultraviolet radiation. The disinfection equipment consists of "X" UV-C radiation emitting lamps. The positioning of the mobile disinfection robot during the automatic control is divided into "Z" stages, the first is the recognition of obstacles for its displacement; the second is the mapping and automatic selection of coordinates for the movement, the third is the rotation of the disinfection system on its own axis at specific points of the sensed environment, the fourth is the repositioning of the mobile automaton and the repetition of the cycle within the estimated time period, considering that for a surface "A" a contact for "B" seconds at a distance of "C" meters is required. The automatic system of the mobile disinfection robot is intended to demonstrate that it is possible to improve the working conditions of hospital personnel and increase the safety of patients housed in these care centers.</p>
<p>KEYWORDS</p>	<p>Mobile Robot, UV-C Lamp, Cinematic, Disinfection, Hospital</p>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: 

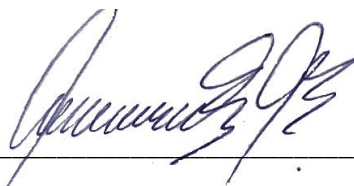
GRANJA ROJAS ADRIÁM RAMIRO
CI: 0202141545

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **GRANJA ROJAS ADRIÁN RAMIRO**, CI 0202141545 autor del proyecto titulado: **“Diseño de robot móvil semiautónomo de desinfección mediante radiación ultravioleta para desactivar agentes virales en entornos hospitalarios.”** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 29 de marzo de 2021

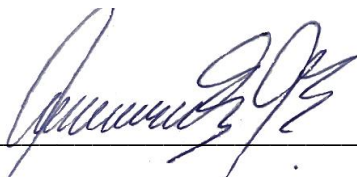


GRANJA ROJAS ADRIÁN RAMIRO
CI: 0202141545

DECLARACIÓN

Yo **GRANJA ROJAS ADRIÁN RAMIRO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Granja Rojas Adrián Ramiro

C.I.: 0202141545

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**Diseño de robot móvil semiautónomo de desinfección mediante radiación ultravioleta para desactivar agentes virales en entornos hospitalarios.**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **GRANJA ROJAS ADRIÁN RAMIRO**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Ing. Nelson Gutiérrez MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1712465713

DEDICATORIA

A Dios quién supo guiarme por el buen camino, brindarme fuerzas para seguir adelante y no flaquear ante los problemas que se presentaban en el camino universitario.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.

Para mis padres, Fabiola y Ramiro por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos más difíciles. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mi hermana Katya por estar siempre presente, acompañándome en toda mi trayectoria universitaria. A mis sobrinas Paz y Emilia quienes son la razón de superación, inspiración y felicidad.

Adrián

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”. Thomas Chalmers

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios por darme el conocimiento, paciencia y salud para terminar mi carrera y este proyecto.

Agradezco a mis padres Fabiola y Ramiro por todo el sacrificio que realizaron para poderme dar la mejor educación, sus consejos y por ser esa ayuda emocional la cual me ayuda a concluir con éxitos en mi vida universitaria.

Al Ingeniero Nelson Gutiérrez, director de este trabajo de titulación por su ayuda, asesoría y aporte de conocimientos para el desarrollo y culminación del proyecto.

A mis asesores, Ingenieros Pablo Velarde y Alejandro Garcés por su apoyo y recomendaciones para la culminación de este proyecto de titulación.

A mi familia y amigos por ese apoyo brindado durante toda mi formación gracias por su apoyo incondicional y desinteresado.

Adrián

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA	10
2.1 REQUERIMIENTOS.....	10
2.1.1 DIAGRAMA DE REQUERIMIENTOS	11
2.1.2 DIAGRAMA DE DEFINICIÓN DE BLOQUES.....	12
2.2 DISEÑO DEL SISTEMA.....	13
2.2.1 DISEÑO MECÁNICO.....	15
2.2.2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA:	16
2.2.3 DISEÑO DE LA TORRE:	16
2.2.4 DISEÑO ELÉCTRICO.....	19
2.2.5 DISEÑO DE CONTROL.....	36
2.2.5.1 Flujograma de control.	36
2.2.5.2 Control tipo PID de los actuadores.	38
2.2.3 Control de Movimiento del robot:	49
2.2.3.1 Control de posición del robot:	49
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	56
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.	Catálogo de BONNET de Aceros Inoxidables	19
Tabla 2.	Datos de actuador para desinfección (emisor de luz UV-C)	21
Tabla 3.	Condiciones de climatización de cuartos	21
Tabla 4.	Efecto de la luz ultravioleta germicida sobre la concentración de microorganismos	22
Tabla 5.	Datos del fabricante del balasto electrónico de 15W	26
Tabla 6.	Catálogo DC Motors de Product Coding System	28
Tabla 7.	Características de baterías	34
Tabla 8.	Catálogo de DC Motors	42
Tabla 9.	Comandos de pruebas HMI	57
Tabla 10.	Comandos de prueba de movimiento del robot	63
Tabla 11.	Comandos para la desinfección en espacio hospitalario	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Variables involucradas en el movimiento del robot	7
Figura 2. Posición del robot en el plano cartesiano	8
Figura 3. Modelo de metodología en V	11
Figura 4. Diagrama de Requerimientos	13
Figura 5. Diagrama de definición de bloques	13
Figura 6. Dosis de radiación UV	14
Figura 7. Lámpara Sylvania para desinfección P23696 de 38W	15
Figura 8. Planos arquitectónicos de un consultorio médico general	16
Figura 9. Boceto del robot	17
Figura 10. Fuerzas presentes en el sistema de la torre.	18
Figura 11. Tubo fluo germ g15 t8 de la marca SYLVANIA	20
Figura 12. Ubicación para dosificación UV-C	24
Figura 13. Balasto electrónico 15W	24
Figura 14. Configuración de balasto electrónico de 15W	25
Figura 15. Dimensiones de balasto electrónico de 15W	25
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre neumático del robot	27
Figura 17. Driver para motores L298N	29
Figura 18. Driver para motores L298N	29
Figura 19. Driver para motores L298N	30
Figura 20. switch on/off	31
Figura 21. Teclado matricial 4 x 4 de membrana	31
Figura 22. Pantalla LCD 16X 2	31
Figura 23. Buzzer Zumbador Activo	31
Figura 24. Diodo Led redondo 5 nm Alto Brillo	32
Figura 25. Batería LiPo Turnigy	35
Figura 26. Batería LiPo Turnigy	35
Figura 27. Esquema Eléctrico del robot	36
Figura 28. Diagrama de flujo del robot móvil de desinfección	38
Figura 29. Motor 6DCD-15-30	39
Figura 30. Torque vs Velocidad del motor	43
Figura 31. Velocidad angular en función del tiempo.	45
Figura 32. Curva de la Función de transferencia del motor DC	46
Figura 33. Sistema de control de velocidades del motor DC	47
Figura 34. Respuesta del sistema con el controlador	49
Figura 35. Respuesta del sistema con el controlador reajustado	50
Figura 36. Diagrama para el cálculo cinemático de trayectoria de movimiento.	51
Figura 37. Modelado 3D del robot exportado a Simulink.	54
Figura 38. Cinemática directa del robot de desinfección.	54
Figura 39. Modelo Cinemático del Robot.	54

Figura 40. Comandos de prueba HMI pasillo.	58
Figura 41. Comandos de prueba HMI habitación.	59
Figura 42. Comandos de prueba HMI baño.	59
Figura 43. Movimiento lineal hacia adelante.	60
Figura 44. Movimiento lineal hacia atrás.	61
Figura 45. Giro sentido horario.	61
Figura 46. Giro sentido antihorario.	62
Figura 47. Paro del robot	62
Figura 48. Simulación de desplazamiento del robot en el pasillo.	64
Figura 49. Simulación de desplazamiento del robot en la habitación	64
Figura 50. Simulación de desplazamiento del robot en el baño	65
Figura 51. Simulación del consultorio médico en entorno virtual	66
Figura 52. Comando HMI para activación del robot	67
Figura 53. Desplazamiento del robot en el consultorio médico	68

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1. Modelo y cinemática del robot	79
Anexo 2. Programa de simulación	80
Anexo 3. Máquinas de estado para el control de trayectoria	81
Anexo 4. Control PI, cinemática e interfaz de conexión con el mundo virtual	82
Anexo 5. Control motores	83
Anexo 6. Cinemática directa	84
Anexo 7. Mundo virtual	85
Anexo 8. Ficha técnica del acero inoxidable	86

RESUMEN

El robot móvil de desinfección es un equipo que permite optimizar el proceso de esterilización en ambientes que requieren un nivel elevado de asepsia, utilizando las propiedades germicidas de la radiación ultravioleta. El diseño del sistema abarca dos etapas generales, el autómata móvil y el equipo de desinfección, partiendo de un robot móvil de dos niveles. En el primer nivel se contempla la distribución de motores, encoders, baterías, ruedas y controladores de movilidad, en el segundo nivel, o nivel superior, el equipo de desinfección, sensado y control de posicionamiento automático. El funcionamiento del sistema consiste en un equipo semiautomático, por tanto, requiere un operador para su traslado mediante radiocontrol. El autómata móvil se compone de dos motores de corriente continua acoplados directamente a dos ruedas de tracción y dos puntos de apoyo para el equilibrio. Durante el control manual, el equipo de desinfección no se puede activar, para evitar el contacto directo de seres humanos con la radiación ultravioleta. El equipo de desinfección consiste en "X" lámparas emisoras de radiación UV-C. El posicionamiento del robot móvil de desinfección durante el control automático se divide en "Z" etapas, la primera es el reconocimiento de obstáculos para su desplazamiento; la segunda es el mapeo y la selección automática de coordenadas para el movimiento, la tercera es la rotación del sistema de desinfección sobre su propio eje en puntos específicos del ambiente sensado, la cuarta es el reposicionamiento del autómata móvil y la repetición del ciclo dentro del período de tiempo estimado, considerando que para una superficie "A" se requiere un contacto por "B" segundos a una distancia de "C" metros. Con el sistema automático del robot móvil de desinfección se pretende demostrar que es posible mejorar las condiciones de trabajo del personal hospitalario e incrementar la seguridad de los pacientes alojados en estos centros de atención.

Palabras clave: Robot móvil, Lámpara UV-C, Cinemática, Desinfección, Hospital

ABSTRACT

The mobile disinfection robot is a device that optimizes the sterilization process in environments that require a high level of asepsis, using the germicidal properties of ultraviolet radiation. The design of the system comprises two general stages, the mobile automaton and the disinfection equipment, starting from a two-level mobile robot. The first level includes the distribution of motors, encoders, batteries, wheels and mobility controllers, while the second level, or upper level, includes the disinfection, sensing and automatic positioning control equipment. The operation of the system consists of a semi-automatic equipment, therefore, it requires an operator to move it by means of radio control. The mobile automaton consists of two DC motors directly coupled to two drive wheels and two support points for balancing. During manual control, the disinfection equipment cannot be activated, to avoid direct human contact with ultraviolet radiation. The disinfection equipment consists of "X" UV-C radiation emitting lamps. The positioning of the mobile disinfection robot during the automatic control is divided into "Z" stages, the first is the recognition of obstacles for its displacement; the second is the mapping and automatic selection of coordinates for the movement, the third is the rotation of the disinfection system on its own axis at specific points of the sensed environment, the fourth is the repositioning of the mobile automaton and the repetition of the cycle within the estimated time period, considering that for a surface "A" a contact for "B" seconds at a distance of "C" meters is required. The automatic system of the mobile disinfection robot is intended to demonstrate that it is possible to improve the working conditions of hospital personnel and increase the safety of patients housed in these care centers.

Keywords: Mobile Robot, UV-C Lamp, Cinematic, Disinfection, Hospital

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas eficientes, simples y económicas para la asepsia de superficies, ha planteado varias soluciones, entre ellas, los tratamientos con radiación ultravioleta o luz ultra violeta (UV), mediante dosis controladas y períodos de tiempo cortos. La radiación ultravioleta natural o artificial puede producir efectos adversos por su exposición prolongada o errónea, siendo éste el motivo de implementar elementos de control y automatismos para prevenir afectaciones negativas. En ambientes controlados o condiciones artificiales se pueden manipular los efectos producidos por la exposición a la radiación ultravioleta para obtener resultados a conveniencia (Fernández, Poletta, Imhof, & Siroski, 2013).

Para controlar la expansión de patógenos en ambientes hospitalarios, con rutinas higiénicas estrictas que requieren limpieza y desinfección de superficies combinadas con material biológico tradicionalmente se utilizan productos químicos como el cloro y la cloramina al 5%. La desinfección química a más de no ser amigable con el medio ambiente, tiende a ser laboriosa. La luz ultra violeta tipo C (UV-C) tiene efectos germicidas para microorganismos en agua, superficies y aire y es usada para la desinfección dentro y fuera de hospitales (B.M, Banrud, Boe, & Bjordal, 2006).

Los robots móviles, objetivamente los robots con ruedas, han sido diseñados para eliminar las limitaciones de los robots fijos, si a un robot móvil se le añaden características de sensado y la capacidad de escaneo 3D, se obtiene un equipo de mapeo bajo el principio de mostrar los objetos reales en un software, obteniéndolos en forma digital para manipularlos, modificarlos, o generar acciones de control (Musuña, Zapata, Oñate, & Campusano, 2014).

La exposición a luz UV-C es un método potente para inactivar microorganismos y enzima. La tecnología se caracteriza por su facilidad de uso, bajo costo, consumo energético y mantenimiento, a más de no dejar residuos tóxicos. La desventaja de esta tecnología, dependiendo de la aplicación a la que se oriente, es la poca penetración que tiene en productos alimenticios y líquidos (Manzocco, y otros, 2011).

El trabajo planteado, propone el desarrollo del diseño, simulación y validación de un equipo capaz de desinfectar, utilizando luz UV-C, superficies localizadas en diferentes áreas de trabajo, sensando la presencia de personas o animales en el área de influencia, evitando de esta forma el contacto no deseado con la radiación emitida por la luz ultravioleta.

El problema de la desinfección química parte de no ser amigable con el medio ambiente y tornarse ardua en labores y costos, dejar residuos en las superficies tratadas, penetrar y reconfigurar la composición de fluidos y alterar el aire. La luz UV-C cumple con optimizar este proceso siempre y cuando se

encuentre debidamente controlada, al mantener un equipo fijo, sin sensado y de uso manual, se desaprovecha la capacidad de alcance de las ondas de luz UV-C, pudiendo sobrepasar tiempos recomendados de exposición o no cumplirlos y mantener vivos microorganismos en las superficies tratadas (B.M, Banrud, Boe, & Bjordal, 2006).

La luz UV-C es letal para bacterias, virus, moho, levaduras y algas, sin embargo, la dosis para inactivar estos compuestos, es variable. La radiación es absorbida por materiales orgánicos y su capacidad de penetrarlos es muy baja, por tanto, la limpieza de residuos visibles o sólidos es necesaria antes de iniciar el procedimiento de desinfección UV-C. Al implementar la radiación ultravioleta en un equipo móvil el alcance de la misma puede ser aprovechado en su mayoría y mediante sensado se previenen exposiciones no deseadas al tratamiento (Manzocco, y otros, 2011).

Los robots móviles pueden mantener diversas configuraciones para su desplazamiento, sea por posiciones, conteo de pasos, control numérico, sensado, escaneo 3D y validación manual. El control de la potencia de emisión de luz en un robot móvil extiende la capacidad de ésta para desinfectar superficies (Musuña, Zapata, Oñate, & Campusano, 2014).

Como parte de la demanda de optimización de procesos y la reducción de exposición de los seres humanos a riesgos biológicos, en su mayoría generados por el COVID-19 durante la actualidad, se vuelve necesario implementar equipos de control direccionados a la sanidad de superficies, desinfección y limpieza en general. La alternativa de un robot con la capacidad de garantizar este proceso en diferentes salas o ambientes por la opción de traslación es la solución a una creciente necesidad.

En el panorama actual, la prevención y cuidado del ambiente en el que nos desenvolvemos ha dado un vuelco importante, con la aparición de una pandemia mundial y las falencias encontradas en los sistemas de desinfección tradicionales, la desinfección mediante radiación UV, específicamente, por luz UV-C surge como una solución a esta alarma.

La aplicación de la radiación UV para desinfección fue descubierta en 1877, al ejecutar pruebas con tubos de ensayo en la luz solar y observar que estos permanecían libres de microorganismos. Estas primeras investigaciones apuntaron hacia algunos factores claves influyen en el rendimiento de la UVGI (irradiación germicida ultravioleta por sus siglas en inglés). La inactivación de una fracción determinada de organismos depende de la dosis de radiación recibida (Reed, 2010).

Los microorganismos son particularmente vulnerables a la luz ultravioleta a longitudes de onda cerca de los 254 nm ya que ésta representa la longitud de

onda de absorción máxima de su molécula de ácido desoxirribonucleico (Sánchez, Arias, Armenta, & Salas, 2012).

La radiación UV se divide en 3 categorías, UV-A, UV-B y UV-C. La radiación UV-A posee una longitud de onda de 315-400 nm, la radiación UV-B una longitud de onda de 280-315 nm y la radiación UV-C una longitud de onda de 100-280nm, siendo este el justificante para la utilización de luz UV-C en esta aplicación. La tasa de fluencia de radiación UV se expresa mediante micro watts por metro centímetro cuadrado uW/cm^2 , y la dosis de radiación UV que ha recibido una superficie durante un tiempo específico se calcula multiplicando este factor por el tiempo en segundos (s), expresando el resultado en micro watts segundo por centímetro cuadrado uWs/cm^2 (Boyce & Donskey, 2019).

Algunos de los fabricantes de dispositivos de desinfección mediante radiación UV-C recomiendan que se ejecuten dos ciclos en tres distintas ubicaciones de la habitación utilizando torres verticales o bombillas ajustables para proporcionar una mayor proximidad a la superficie de interés. Los parámetros a tener en cuenta para una correcta desinfección, utilizando radiación UV-C son el tiempo de exposición y la distancia desde el punto de irradiación hasta la superficie a ser desinfectada. Estudios previos han demostrado que en superficies horizontales en zonas sombreadas a una distancia de 3.3 m por 15 min con una dosis de radiación UV-C de 8,880 uWs/cm^2 se han obtenido resultados óptimos (Boyce & Donskey, 2019).

Torres UV-C:

Las torres UV-C son lámparas germicidas estacionarias orientadas a la desinfección de superficies, su funcionamiento consiste en la irradiación de un tubo de luz UV de onda corta durante períodos de tiempo establecidos de acuerdo con la superficie del lugar a desinfectar. En el mercado se pueden encontrar varios fabricantes y una gran variedad de equipos.

Bombillas y tubos UV-C

Las bombillas y tubos UV-C son actuadores de luz que emiten radiación ultravioleta de onda corta, en su mayoría, al igual que los actuadores de luz tradicionales, funcionan con base en corriente alterna y frecuencias estandarizadas.

Las tecnologías de desinfección de habitaciones automatizadas se utilizan cada vez más como complemento de la limpieza y desinfección estándar en las instalaciones sanitarias. Los dispositivos de radiación ultravioleta (UV) han sido los más adoptados debido a la eficiencia y eficacia bien documentada de

la irradiación UV. Actualmente se están comercializando varios dispositivos de desinfección de salas por rayos UV (Nerandic, y otros, 2015).

La integración de un sistema de desinfección por luz UV-C y un autómata móvil requiere combinar dos sistemas de alimentación, corriente directa y corriente alterna, a razón de abastecer las lámparas UV-C y los elementos de tracción y sensado, considerando la conversión DC-AC.

Un inversor es un dispositivo que emplea diversas configuraciones eléctricas, electrónicas o electromecánicas para convertir una señal lineal (corriente continua) en una señal alterna con período y frecuencia determinados de acuerdo a su configuración, anteriormente los inversores utilizaban alternadores para generar pulsos y obtener una señal sinusoidal como salida, sin embargo, en la actualidad, estas configuraciones se han vuelto obsoletas.

La gestión correcta de recursos en un inversor está dirigida por microcontroladores con la capacidad de modular el ancho del pulso a trabajar y direccionar el mismo a un transformador para obtener una señal sinusoidal a partir de una onda cuadrada. Comercialmente existe una gran variedad de inversores por sus aplicaciones en vehículos, energías renovables y dispositivos móviles con actuadores de corriente alterna.

El desarrollo de robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de la aplicación de la robótica, su importancia radica principalmente en que poseen un espacio de trabajo ilimitado, a diferencia de los robots manipuladores fijos, los cuales están restringidos a cumplir tareas dentro de un espacio de trabajo determinado por sus dimensiones físicas (Hernández, Eguibar, Cortés, & Reyes, 2017).

A diferencia de los robots fijos, los robots móviles cambian con cada movimiento la posición y orientación de su eje de coordenadas base. Por consiguiente, deben reconocer constantemente el ambiente donde se mueven para poder adaptarse adecuadamente. Para que un sistema robótico móvil pueda ser exitoso necesita contar con una buena etapa de sensado y tener cierto grado de autonomía (Hernández, Eguibar, Cortés, & Reyes, 2017).

Existen diversos métodos para la orientación de un robot móvil en interiores, la odometría es una técnica utilizada para la estimación del posicionamiento de robots; es implementada comúnmente con codificadores ópticos, los cuales son ubicados en las ruedas del robot para contabilizar el número de pulsaciones por giro de las ruedas que emite el codificador óptico (Musuña, Zapata, Oñate, & Campusano, 2014).

Los Sistemas de Navegación Inercial (INS por sus siglas en inglés) estiman la posición y orientación del vehículo empleando medidas de las aceleraciones

y ángulos de orientación. La primera integración de las aceleraciones proporciona la velocidad y la segunda la posición. Los acelerómetros suelen estar basados en sistemas pendulares. La precisión del acelerómetro resulta crítica, ya que, debido a la doble integración de las aceleraciones, incluso pequeños errores cometidos por éste repercuten notablemente en la posición estimada (González & Ollero, 1996).

Los estimadores basados en la percepción del entorno emplean sensores que suministran información sobre éste a partir de la cual se infiere la localización del robot móvil mediante la comparación de esta información con otros datos o modelo conocido del entorno. Estos sensores pueden clasificarse en dos grupos, activos y pasivos, siendo los activos aquellos que emiten algún tipo de energía (láser, ultrasonido) y los pasivos los que captan la energía existente en el medio (cámaras y sensores infrarrojos). (Bambino, 2008).

Los motores paso a paso o también llamados “de movimiento indexado” o simplemente “de pasos” están diseñados para girar un determinado ángulo dependiendo de sus señales de control, se puede tener información precisa de la posición del elemento accionado con sólo contar los pulsos suministrados al mismo, no necesitando sensores de posición ni control por retroalimentación (Conti, 2005).

Un motor paso a paso se puede comparar con uno síncrono en lo que se refiere al principio de funcionamiento: un campo magnético rotativo, generado por el control electrónico, pone en marcha un rotor magnético. Estos motores se diferencian entre sí por la forma en que se genera el campo magnético, unipolar, bipolar o devanado del estator, y el material con el que se ha construido el rotor, imán permanente o hierro dulce (Conti, 2005).

El control del posicionamiento de un robot móvil de dos ruedas con tracción diferencial utilizando motores a pasos elimina el tiempo de procesamiento en lecturas de sensores durante el movimiento, orientando giros, desplazamientos y velocidad en una orden previa al funcionamiento del actuador (pasos controlados por pulsos).



Figura 1. Variables involucradas en el movimiento del robot (Collazo, Gorrosieta, Pedraza, Villaseñor, & Romero, 2009).

Para determinar el comportamiento del robot, se analizan las principales variables que intervienen en el movimiento del mismo, θ_1 = velocidad angular de la rueda 1, θ_2 = velocidad angular de la rueda 2, V = velocidad del cuerpo del robot, φ = velocidad angular del cuerpo del robot, b = radio del robot, r = radio de las ruedas (Collazo, Gorrosieta, Pedraza, Villaseñor, & Romero, 2009).

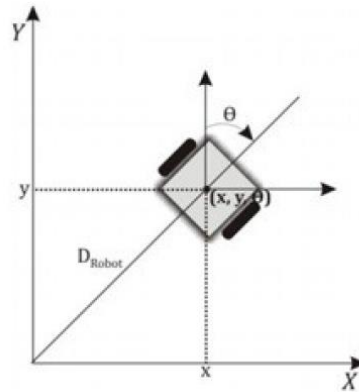


Figura 2. Posición del robot en el plano cartesiano (Musuña, Zapata, Oñate, & Campusano, 2014).

La orientación del robot móvil se encuentra representada en el plano cartesiano (x, y) con un ángulo de inclinación Θ , para el cálculo de la posición en el plano cartesiano se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$x = \left(\frac{S_{Izquierda} + S_{Derecha}}{2} \right) * \sin\theta + x_0 \quad (1)$$

$$y = \left(\frac{S_{Izquierda} + S_{Derecha}}{2} \right) * \cos\theta + y_0 \quad (2)$$

Siendo $S_{Izquierda}$ = desplazamiento de la rueda izquierda, $S_{Derecha}$ = desplazamiento de la rueda derecha, θ = ángulo de rotación del robot, x_0 = posición inicial en x , y_0 = posición inicial en y . (Musuña, Zapata, Oñate, & Campusano, 2014)

Con base en lo expuesto anteriormente se propone el siguiente objetivo general:

Diseñar, simular y validar un Robot Móvil semiautónomo de desinfección mediante radiación Ultravioleta para desactivar agentes virales en entornos hospitalarios de alto riesgo de contagio que pueden causar daños a la salud de los pacientes y del personal que labora.

Para cumplir con el objetivo general planteado se presenta a continuación los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el estudio y dimensionamiento de los parámetros de desinfección mediante radiación ultravioleta para la eliminación de agentes patógenos y las alternativas de control adecuadas para el desplazamiento del robot móvil en ambientes hospitalarios.
- Diseñar el sistema mecatrónico del robot móvil semiautónomo, su desplazamiento manual y posicionamiento por sensado, integrando el proceso de radiación ultravioleta controlada, sin exposición riesgosa.
- Validar el modelo mecatrónico de robot móvil semiautónomo para desinfección, mediante simulación por medio de herramientas de software.

2. METODOLOGÍA

El modelo en V aplicado a sistemas mecatrónicos es un proceso secuencial e integrador de todas las etapas de diseño, parte de las especificaciones o requerimientos, el diseño conceptual del sistema, su diseño específico e integración, con ciclos constantes de verificación y validación como se muestra en la Figura 3.

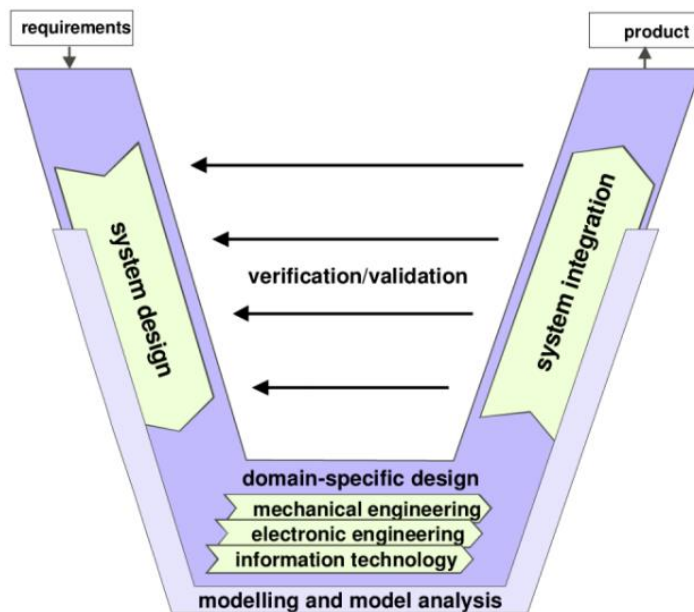


Figura 3. Modelo de metodología en V
(Colomer, 2013)

REQUERIMIENTOS

- Para cumplir los requisitos de ingreso, durabilidad y mantenimiento de instalaciones hospitalarias, tanto la estructura del robot como sus elementos deben simplificar su limpieza y maniobrabilidad, se debe trabajar con acero inoxidable.
- Para diseñar el autómatas móvil de desinfección se considera un equipo de dos niveles, manteniendo en el nivel bajo los elementos de movilidad, autonomía y control, para en el segundo nivel distribuir el sistema de desinfección.
- La lámpara que se debe ocupar para la desinfección deben ser UV-C
- Al ser un equipo semiautomático, no se descartan posibles traslaciones manuales o levantamientos del suelo para posicionamiento, siendo necesario limitar el peso para evitar riesgos ergonómicos con estas acciones. Diversas referencias a salud laboral recomiendan no sobrepasar los 15 kg de carga en condiciones ideales. (Universidad de Málaga, 2006)

- El robot móvil de desinfección se considera en 3 ejes de diseño fundamentales: el tiempo y la distancia de separación a la superficie de trabajo del sistema desinfección, el posicionamiento del robot dentro del área de trabajo, el desplazamiento entre puntos clave de desinfección.

- **Diseño Específico**

El diseño específico del sistema consta de tres fases:

- **Diseño mecánico:** Subsistema que da dimensiones, forma y material de la estructura del robot. Se encarga de sostener los elementos de todo el sistema en sus posiciones determinadas. Se toman en consideración las dimensiones de las habitaciones hospitalarias y el área de circulación de las mismas. El diseño mecánico cuenta con el diseño del chasis (base) y la torre central.
 - Robustez mecánica: Su construcción garantiza durabilidad y resistencia en su uso
 - Peso total del sistema: El prototipo debe pesar un máximo de 15kg.
 - Tracción diferencial: Cada rueda del robot posee un motor.
- **Diseño eléctrico y electrónico:** Subsistema encargado de energizar a todos los elementos electrónicos del robot durante el tiempo necesario para que el robot cumpla el objetivo de funcionamiento (desinfectar un área $10m^2$ en 15 min).
 - Autonomía: El prototipo es capaz de funcionar 45 minutos en su función de desinfección.
- **Diseño de control:** Subsistema que permite el desplazamiento (a través de las ruedas) inspeccionado del robot, incluye el posicionamiento y orientación del mismo.
 - Trayectoria: El robot puede realizar tres tipos de movimiento, en línea recta, giro al lado derecha y giro al lado izquierdo.
 - HMI: El robot posee una interfaz humano-máquina, donde se ingresa por teclado el recorrido que debe seguir el robot.
 - Velocidad: La velocidad del robot es de aproximadamente 0.1 m/s.

2.1.1 DIAGRAMA DE REQUERIMIENTOS

Se presenta el diagrama de requerimientos del proyecto, considerando necesaria la retroalimentación por parte del personal hospitalario y la integración de protocolos de medición de agentes virales en las áreas de trabajo se resumen en la Figura 4.

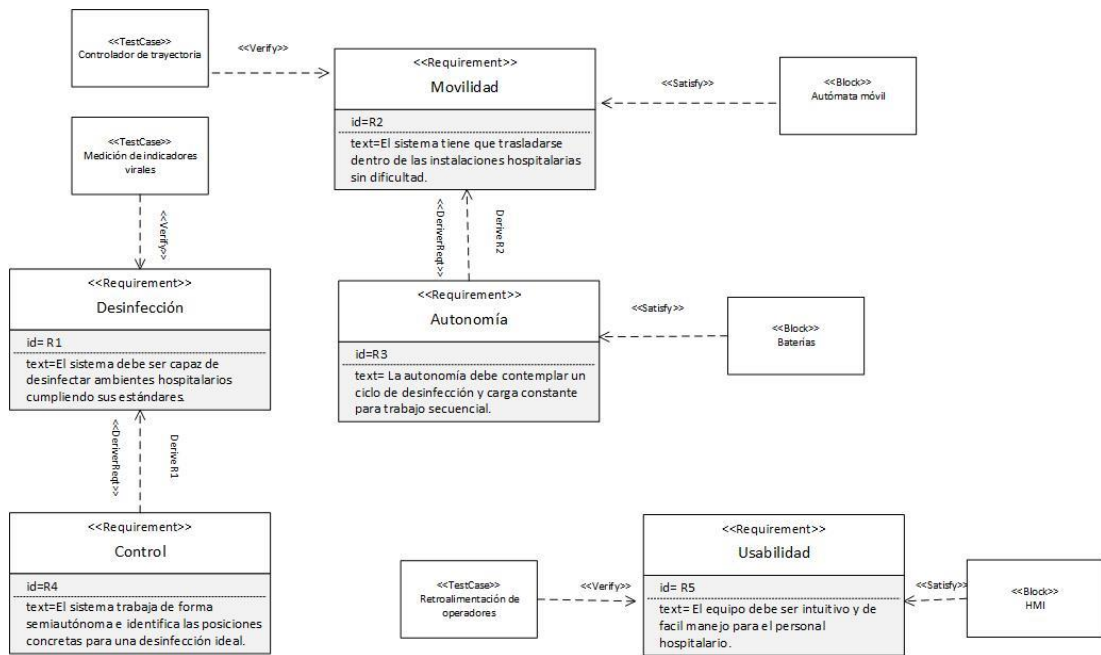


Figura 4. Diagrama de Requerimientos

2.1.2 DIAGRAMA DE DEFINICIÓN DE BLOQUES

El diagrama de definición de bloques muestra la descripción general del sistema y sus principales atributos con su función y relevancia se muestra en la Figura 5.

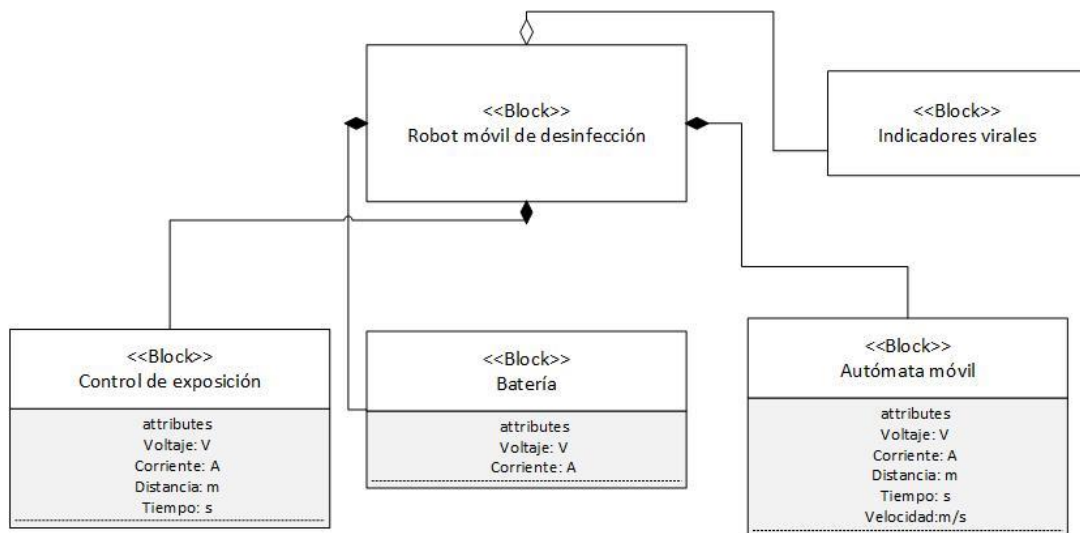


Figura 5. Diagrama de definición de bloques

DISEÑO DEL SISTEMA

Para el diseño y selección de componentes del sistema de desinfección se considera la condición crítica de trabajo las paredes de un consultorio médico promedio como la superficie elevada más grande a estar en contacto con luz UV-C.

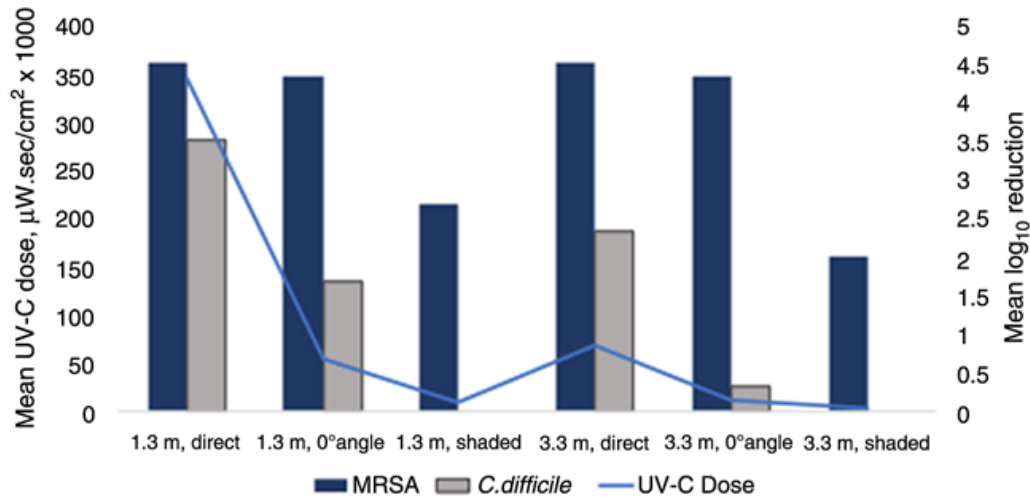


Figura 6. Dosis de radiación UV
(Boyce & Donskey, 2019)

La Figura 6 muestra la dosis de radiación UV-C administrada en un ciclo de 5 minutos por un dispositivo móvil en varios lugares de la habitación de un paciente, verificada por un radiómetro y las correspondientes reducciones de microorganismos en términos de log10 (Boyce & Donskey, 2019).

Un estudio señala que al incrementar la dosis de $3395 \mu Ws/cm^2$ a $8880 \mu Ws/cm^2$ en una superficie horizontal pasando de un ciclo de 5 minutos a un ciclo de 15 minutos, se obtiene una reducción considerable de la contaminación en la pintura de los muros (Boyce & Donskey, 2019).

Para lo cual los equipos estacionarios de desinfección mediante radiación UV-C referencian la superficie a trabajar y el tiempo requerido, en sus manuales. Con equipos del fabricante Sylvania, por ejemplo, considerando una intensidad UV a 1 metro de distancia, de $147 \mu W/cm^2$ con 38W de potencia, para desinfectar en 15 minutos un área de $10m^2$ se obtiene lo siguiente:

$$Dosis\ UV - C = \frac{147 \mu W}{cm^2} * 900s = 132300 \mu Ws/cm^2 \quad (3)$$

Estos valores pueden respaldarse con un estudio que informó que en superficies horizontales en áreas sombreadas a una distancia de 3.3 m, con un tiempo de ciclo de 15 minutos y dosis media de UV-C de $8.880 \mu Ws/cm^2$ se logró una reducción notoria de la contaminación en superficies (Boyce & Donskey, 2019).

Se analizan estos datos, y se puede asumir que con un equipo de 38 W o superior con una intensidad UV de $147 \mu Ws/cm^2$ a 1m de distancia se desinfectan $10m^2$ en 15 minutos, como lo indica el fabricante.

En la Figura 7 se puede observar las lámparas UV-C con su sistema de desinfección de 38 W

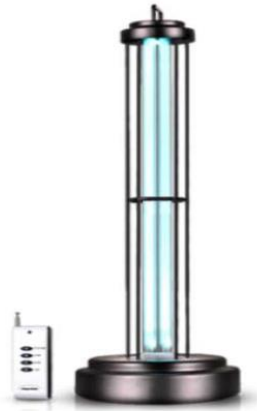


Figura 7. Lámpara Sylvania para desinfección P23696 de 38W

En una de las guías de diseño arquitectónico para establecimientos de salud aprobada por la organización mundial de la salud (OMS) se señala la distribución de un consultorio médico estándar, de la siguiente manera:

Debe cumplir ciertos criterios de longitud y ancho para que el robot pueda desplazarse y realizar la desinfección de las habitaciones hospitalarias, de acuerdo con guías de diseño arquitectónico para establecimientos de salud como muestra la Figura 8 aprobada por la OMS (Ministerio de Salud Pública del Ecuador , 2015).

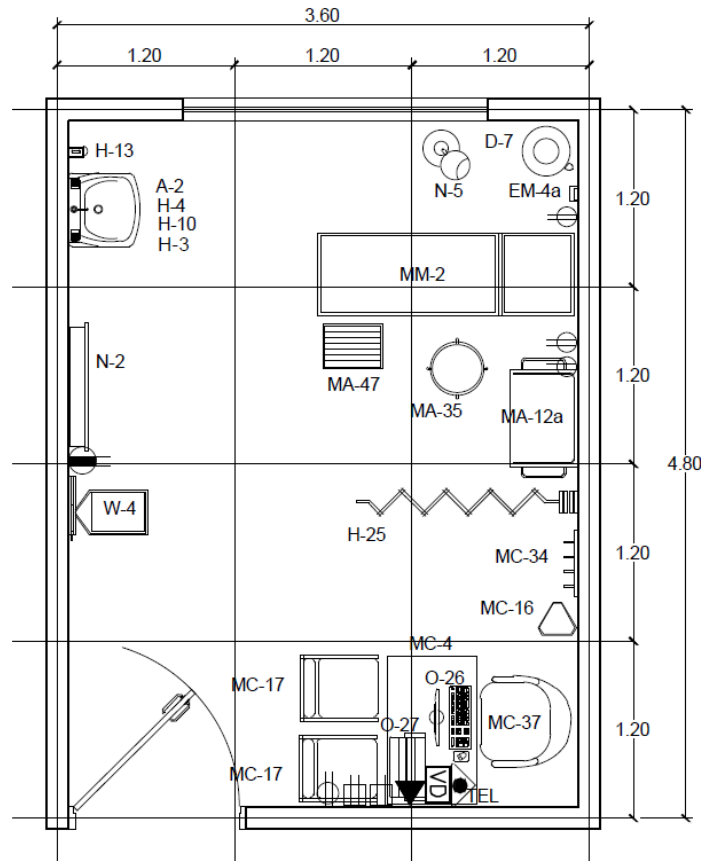


Figura 8. Planos arquitectónicos de un consultorio médico general
(Ministerio de Salud Pública del Ecuador , 2015)

La superficie de desplazamiento del robot debe cumplir las dimensiones señaladas en la Figura 8, con una superficie general de 4.8m x 3.6m, dando un área resultante de $17.28m^2$.

Si se considera un perímetro limpio, la distancia que robot debe recorrer es 16.8m para desinfectar un consultorio. El tiempo requerido para que el robot mejore las prestaciones de equipos de desinfección fijos, debe mantener iguales o mejores condiciones, es decir, no superar los 15 minutos por consultorio.

2.1.3 DISEÑO MECÁNICO

El material usado en la estructura es acero inoxidable AISI 316 Recocido, gracias a su larga durabilidad y debido a las normativas de indumentaria para hospitales. Además, el acero inoxidable AISI 316 presenta una resistencia a la corrosión ligeramente superior a los AISI 302 y 304.

2.1.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA:

Se encarga de sostener los elementos de todo el sistema en sus posiciones determinadas como muestra la Figura 9.

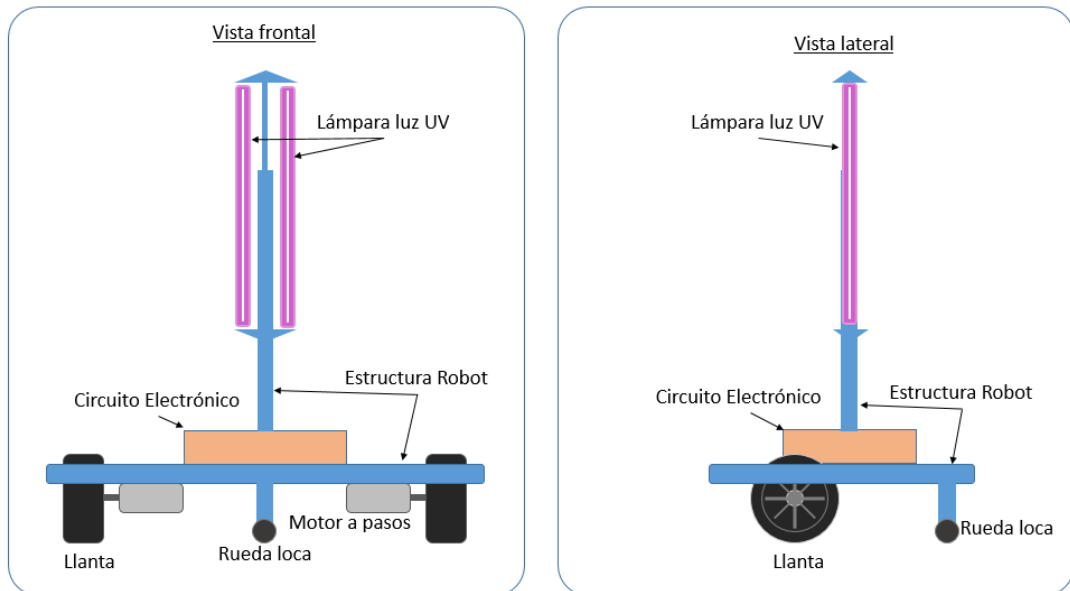


Figura 9. Boceto del robot

2.1.5 DISEÑO DE LA TORRE:

Es el tubo vertical que sostiene el sistema de las lámparas UV-C a la altura adecuada para el funcionamiento del robot.

El diseño de la torre se lo realiza tomando en cuenta el peso del sistema que va montado en la torre (0.8 Kg), la aceleración del robot $\left(2 \left[\frac{m}{s^2}\right]\right)$ y un factor de diseño de $N=3$.

En la Figura 10 se puede observar las fuerzas presentes para los cálculos.

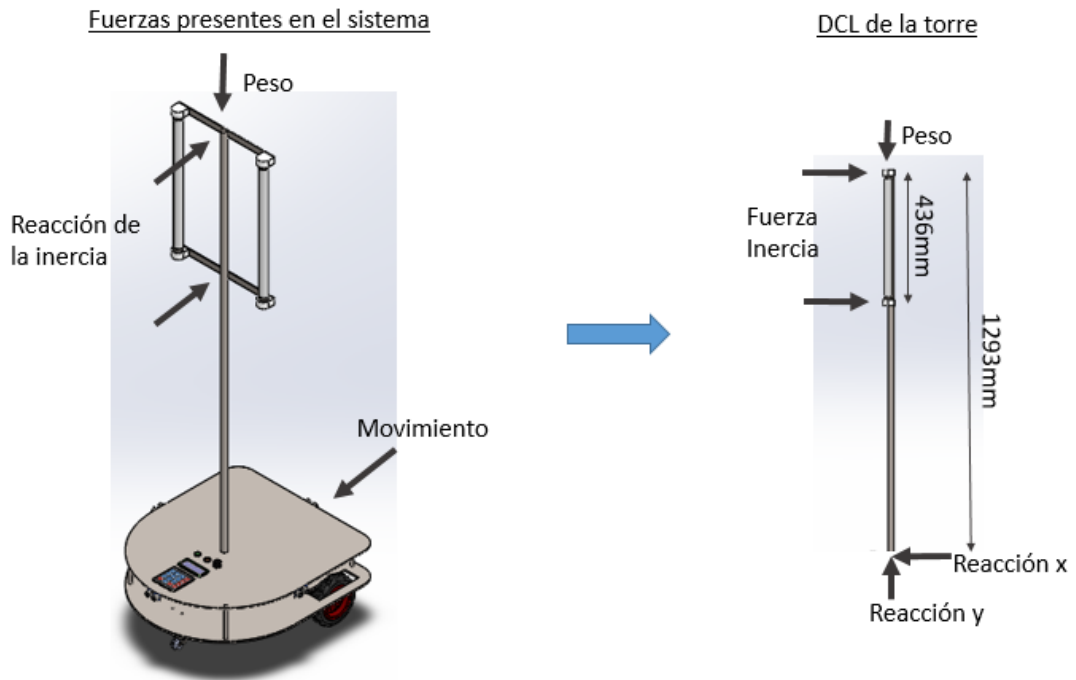


Figura 10. Fuerzas presentes en el sistema de la torre.

La Fuerza por inercia es:

$$F_{inercia} = M_{Lamparas} * a_{robot} = 0.8[Kg] * 2 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 1.6 [N] \quad (4)$$

Cálculo del peso:

$$Peso = M_{Lamparas} * gravedad = 0.8[Kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 7.84 [N] \quad (5)$$

Suma de momentos para el equilibrio de sumar 0 ($\sum M=0$), si reemplazamos la fuerza por la inercia obtenida en la Ecuación 4 se tiene:

$$M_{Reacción} = F_{Inercia}[N] * distancia[m] = 1.6[N] * 1.075[m] = 1.72[Nm] [N] \quad (6)$$

El esfuerzo al que está sometido dicho elemento esta descrito por la Ecuación 7:

$$\sigma_{compresión} + \sigma_{flector} = \frac{F}{A} + \frac{M}{S} > \frac{S_u}{N} \quad (7)$$

Al reemplazar en la Ecuación 7 el peso y el momento obtenidos en las Ecuaciones 5 y 6 respectivamente se obtiene:

$$\frac{7.84}{A} + \frac{1.72}{S} < \frac{552 \text{ [MPa]}}{3} \quad (8)$$

Tomando en cuenta la ecuación 8 se escoge el tubo comercial de menores medidas, del catálogo de BONNET de aceros inoxidable, descritas en la Tabla 1:

Tabla 1. Catálogo de BONNET de Aceros Inoxidables

Diámetro mm	Espesor mm	316
18	0.7	72602240
22	0.7	72602300

Con los valores del tubo escogido ahora es posible resolver los valores de área (A) y módulo de sección (S) de la Ecuación 8:

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(18^2 - (18 - 1.4)^2)}{4} = 38.05 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (9)$$

$$S = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{\pi(18^4 - (18 - 1.4)^4)}{32 \cdot 18} = 158.40 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (10)$$

Ahora se reemplaza en la Ecuación 8 los valores obtenidos en las Ecuaciones 9 y 10 para comprobar si es que el tubo escogido soporta el esfuerzo al que está sometido:

$$\frac{7.84}{38.05} + \frac{1.72}{158.4} < \frac{552 \text{ [MPa]}}{3} \rightarrow 0.27 < 184 \quad (11)$$

Con la Ecuación 11 se puede concluir que el tubo escogido va a soportar el esfuerzo al que está sometido.

A de más la deformación teórica del tubo esta descrita por la Ecuación 12:

$$\delta \text{ [mm]} = \frac{F \text{ [N]} * L \text{ [mm]}}{A \text{ [mm}^2\text{]} * E \text{ [} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\text{]}} = \frac{1.6 \text{ [N]} * 1500 \text{ [mm]}}{38.05 \text{ [mm}^2\text{]} * 187.5 * 10^3 \text{ [} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\text{]}} = 3.364 * 10^{-4} \text{ [mm]} \quad (12)$$

Por el valor obtenido en la Ecuación 12 se puede decir que la deformación del tubo es despreciable.

2.1.6 DISEÑO ELÉCTRICO.

2.1.6.1 Sistema de desinfección con rayos UV-C:

Para esta aplicación se ha seleccionado un tubo fluorescente germicida esterilizador de 15W, cuyo funcionamiento se controla por un balasto electrónico, haciéndolo ideal para un dispositivo móvil.



Figura 11. Tubo fluo germ g15 t8 de la marca SYLVANIA

En la Figura 10 se encuentra el tubo de luz UV-C seleccionado, mismo que posee una potencia de 15 W y una referencia de ciclo de desinfección del fabricante, para un tubo ensamblado, de un cuarto de 10m² en 30 minutos.

Tabla 2. Datos de actuador para desinfección (emisor de luz UV-C)

Datos generales		Datos físicos		Datos eléctricos	
Color de luz	UV	Forma	Tubular	Potencia de entrada	15 W
Ángulo de apertura	330°	Protección IP	IP20	Tensión nominal de operación	57 V
Tipo de distribución	Directa asimétrica	Dimensiones (ΦxH)	Φ25x436 nm	Corriente	0,33 A
Intensidad UV a 1 metro	44 μW/cm ²	Base bombilla	G13	Atenuable	No
Pico spectral (nm)	254 nm	Temperatura ambiente nom	25°C		
Vida útil	8000 h	Temperatura ambiente máx	50°C		

En la Tabla 2 se encuentran las características señaladas por el fabricante para el tubo de luz UV-C seleccionado, considerando el posicionamiento en el robot móvil y posibles bloqueos de la luz emitida se utilizarán dos tubos iguales.

Tabla 3. Condiciones de climatización de cuartos

Cuarto	Temperatura °C Pared 3 niveles	Temperatura °C Cuarto	Humedad relativa %	Velocidad del aire m/s rejilla
1	Superior 15,3 Medio 15,1 Inferior 14,6	15,8	69,3	0,9
2	16,8 16,1 15,9	15,9	68	0,8
3	20,4 20,2 20,1	17,8	67,5	0,3

(Sánchez, Arias, Armenta, & Salas, 2012)

Tabla 4. Efecto de la luz ultravioleta germicida sobre la concentración de microorganismos

Cuarto	Antes de UVGi		Después de UVGi	
	Bacterias	Hongos	Bacterias	Hongos
1	220 ufc/m ³	100 ufc/m ³	215 ufc/m ³	0 ufc/m ³
2	120 ufc/m ³	75 ufc/m ³	115 ufc/m ³	0 ufc/m ³
3	420 ufc/m ³	114 ufc/m ³	N/A	N/A

(Sánchez, Arias, Armenta, & Salas, 2012)

En las Tablas 3 y 4 se puede verificar las condiciones ideales de trabajo de una lámpara germicida y la eliminación de bacterias y hongos tras la exposición a la Luz ultravioleta germicida (UVGi). La dosis utilizada para estos resultados fue de 400 uWs/cm^2 (Sánchez, Arias, Armenta, & Salas, 2012).

Contrastando estos resultados, se define la dosis UV-C a utilizar, igual o superior a 8880 uWs/cm^2 . En las Tablas 3 y 4 se pueden verificar las condiciones ideales de trabajo de una lámpara germicida y la eliminación de bacterias y hongos tras la luz UVG. La dosis utilizada para estos resultados fue de 400 uWs/cm^2 (Sánchez, Arias, Armenta, & Salas, 2012).

Contrastando estos resultados, se define la dosis UV-C a utilizar, igual o superior a 8880 uWs/cm^2 .

Estimación de altura de pared: 3 m

Recomendación de área y tiempo del fabricante: 10m² en 30 minutos

Con 10m² se puede estimar un perímetro de 14m, obteniendo una superficie lateral de trabajo de 14 m x 3 m= 42 m².

Sin embargo, esta referencia sólo se puede aplicar para equipos estáticos. Al ser éste un dispositivo móvil, consideramos la intensidad UV

Intensidad UV a 1 metro de dos tubos: 2 * 44 uW/cm^2 .

Área de desinfección promedio: 16.8m*3m = 50.4m²

$$Ad = \frac{\text{Dosis requerida}}{\text{Intensidad UV-C de dispos.}} = \frac{8880 \left[\frac{uWs}{cm^2} \right]}{2*44 \left[\frac{uW}{cm^2} \right]} = 100.912s = 1.68min \quad (13)$$

Al resolver la Ecuación 13 se obtiene que el tiempo requerido para una dosificación correcta, a 1m o menos de las superficies es de 1.68 minutos, aproximadamente igual a 101 segundos.

En la Figura 12 se representa la posición idónea para una dosificación correcta de radiación UV-C, partiendo de esto se define el alcance “d” en la pared a una distancia perpendicular de “e”.

$$d = 2 * 100cm * \cos(30) = 173.20cm$$

$$e = 100cm * \sin(30) = 50cm$$

Perímetro promedio de un consultorio médico general: 16.8m

$$\# \text{ ciclos} = \frac{(16.8 * 100)cm}{173.20cm} = 9.69 \rightarrow 10 \text{ ciclos} \quad (14)$$

Con la Ecuación 14 se obtiene que el número de ciclos para un consultorio médico promedio es de 10, para estimar el tiempo de desinfección, despreciando el desplazamiento entre puntos, se puede obtener.

$$\textit{Tiempo aproximado para la esterilización} = 10 * 1.68 \text{ min} = 16.8 \text{ min}$$

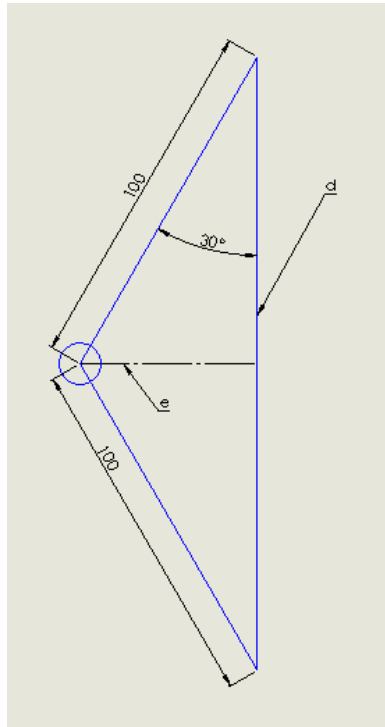


Figura 12. Ubicación para dosificación UV-C

Cada tubo emisor de luz UV-C requiere un balasto electrónico para su control, la potencia nominal del tubo es de 15 W y su consumo de 0.33 A, con estos datos se han seleccionado dos balastos comerciales (uno por cada tubo).



Figura 13. Balasto electrónico 15W
(FIVER Enviroment Group Co., 2020)

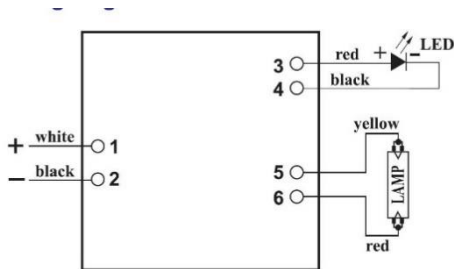


Figura 14. Configuración de balasto electrónico de 15W

(FIVER Enviroment Group Co., 2020)

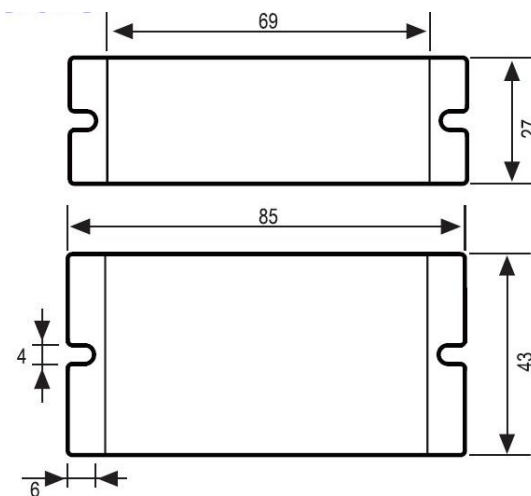


Figura 15. Dimensiones de balasto electrónico de 15W

(FIVER Enviroment Group Co., 2020)

En la Figura 13 se observa el balasto seleccionado, en la Figura 18 la configuración de conexiones del mismo y en la Figura 19 las dimensiones, que serán usadas para el diseño y simulación.

Tabla 5. Datos del fabricante del balasto electrónico de 15W

Voltaje de entrada	10.8-13.2 V
Potencia de entrada	21.4 W
Corriente de entrada	1.78 A @ 12 V
Potencia de lámpara	15 W
Frecuencia de operación	40-70 KHz
Corriente de lámpara	0.30-0.35 A
Eficiencia	≥ 70%
Camino de inicio	Inicio instantáneo
Factor de potencia	≥0.98
Distorsión armónica total	< 15%
Factor de cresta	<1.7
Temperatura ambiente	-15-40 °C
Temperatura máxima de ambiente	70 °C
Encuentro de autenticación	CE UL
1: Arriba están las características estándar 2: El servicio de OEM está disponible	

En la Tabla 4 se tienen los datos técnicos del balasto, es un equipo que trabaja con 12 V DC en la entrada y un máximo de corriente de 1.78 A, alimentando el actuador en la salida con 15 W y una corriente de 0.3-0.35 A, cumpliendo con los requerimientos del tubo de luz UV-C seleccionado.

2.1.6.2 Selección de motores:

Para la selección del motor se necesita saber el torque necesario, para lo cual se utiliza las siguientes consideraciones:

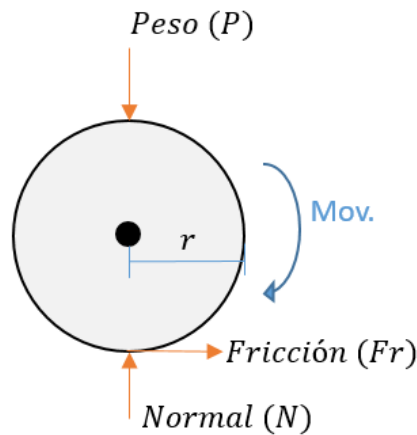


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre neumático del robot

$$Potencia [W] = Torque [Nm] * velocidad\ angular \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (15)$$

Como ya se había definido antes el peso máximo del robot móvil no debe exceder a 15 Kg, dicho peso está soportado sobre dos llantas (El peso estará distribuido de igual manera entre las dos llantas):

$$P = masa [Kg] * gravedad \left[\frac{m}{s^2} \right] = 7.5 [Kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 73.5 [N] \quad (16)$$

Se asume que no existe deslizamiento de las ruedas con el suelo por lo que el coeficiente de rozamiento será aproximadamente igual a 1 (μ), a de más se sabe que la fuerza normal es igual al peso; entonces si reemplazamos los valores de μ y el obtenido en la Ecuación 16, en la Ecuación 17 se tiene:

Entonces:

$$Fr = \mu * Normal[N] = 1 * 73.5 [N] = 73.5 [N] \quad (17)$$

La llanta del tiene un diámetro 5.5 [in] de diámetro lo que equivale a 0.14 [m] aproximadamente, por lo que, si reemplazamos el diámetro de la llanta y el valor obtenido en la Ecuación 17, el torque necesario para mover la llanta estará definido por la Ecuación 18:

$$Torque = T = Fr [N] * r[m] = 73.5 [N] * 0.14[m] = 10.29[Nm] \quad (18)$$

La velocidad lineal del robot es $0.1 \left[\frac{m}{s} \right]$, para alcanzar esa velocidad la velocidad angular (n) mínima de las llantas de diámetro 0.14 [m] es de $1.43 \left[\frac{rad}{s} \right]$.

Si reemplazamos n y el torque obtenido con la Ecuación 18 en la Ecuación 15 se obtiene:

$$Pot = 10.29 [Nm] * 1.43 \left[\frac{rad}{s} \right] = 14.7147 [W]$$

Tabla 6. Catálogo DC Motors de Product Coding System

Motor model	Gearhead model	Gear ratio		100
		r/min		30
6DCG-15-30	6GBD MH	Rated	kgfcm N.m	40.0 4.0
		12 V starting	kgfcm N.m	306.7 30.0
		24 V starting	kgfcm N.m	340 33.3
		90 V starting	kgfcm N.m	373.3 36.7

Se observa en la Tabla 6 que la potencia de salida del motor es 15 [W] y el cálculo teórico requiere una potencia de 14.71 [W], por lo cual la potencia entregada por el motor 6DCD-15-30 es suficiente para desplazar al robot a través de la habitación.

2.1.6.3 Selección del microcontrolador:

El microcontrolador usado en el robot es un Arduino MEGA, por la cantidad de entradas y salidas usadas en el sistema del robot (específicamente se usan 37 entradas y salidas), también debido a la compatibilidad de los periféricos utilizados (descritos a continuación), su lenguaje intuitivo y su capacidad de integración con la herramienta de software Matlab.

2.1.6.4 Selección de Driver:

El driver es el encargado de transformar una pequeña corriente de control (en el Arduino 40 [mA]) en una gran corriente para el control del funcionamiento de los motores. Las características necesarias del driver para los motores seleccionados son:

- Circuito Integrado principal: L298N
- Corriente pico de operación: 4 A
- Corriente constante de operación: 2 A
- Bajo voltaje de saturación en los transistores de salida
- Corte de operación por sobrecalentamiento
- Voltaje de alimentación de motores de hasta 46 volts
- Excelente inmunidad al ruido eléctrico
- Ideal para controlar motores en aplicaciones de robótica



Figura 17. Driver para motores L298N

Entre las características del driver de la Figura 17, se observa que el voltaje de alimentación de los motores es de 5V a 46V, y la corriente máxima es de 2 por lo cual cumple con las características para controlar los motores.

2.1.6.5 Selección de Encoders:

Es el sensor encargado de la medición de la velocidad angular de los motores. Se selecciona el sensor de velocidad con encoder para motores como muestra la Figura 18 con características:

- Módulo Sensor IR Infrarrojo Lector Encoder Óptico Modelo FC-03
- Tensión de Operación: 3.3 a 5V
- Basado en el Comparador LM393
- Salida Digital ON/OFF
- Salida Analógica 0 – 5 V
- LED Indicador de Alimentación y Detección

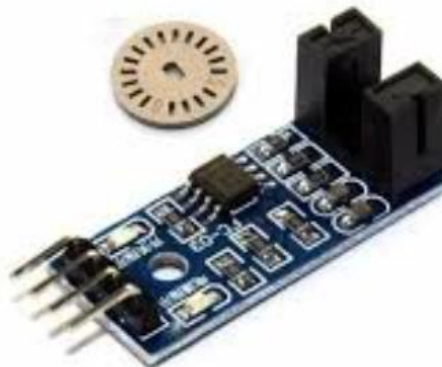


Figura 18. Driver para motores L298N

2.1.6.6 Selección del Sensor:

Los sensores de distancia se encargan de sensar el entorno del robot, en el caso de encontrar un obstáculo en el camino del robot, el robot suspende su funcionamiento y se activa una alarma indicadora. Se selecciona un sensor ultrasónico HCSR04 como muestra la Figura 19 con características:

- Voltaje de operación: 5v
- Conexiones: Vcc, Trigger, Echo, GND
- Rango de medición: 2cm-400cm
- Precisión: $\pm 3\text{mm}$
- Corriente de alimentación: 15mA
- Frecuencia de pulso: 40 KHz
- Angulo efectivo de medición: $< 15^\circ$
- Señal de disparo: 10uS
- Dimensiones del módulo: 45mm/20mm/15mm (largo/ancho/alto)
- Compartir Tuitear 0 Hacer pin +1



Figura 19. Driver para motores L298N

2.1.6.7 Diseño HMI:

A través del interfaz humano máquina, el usuario puede interactuar con el robot;

prender y apagarlo, ingresar las coordenadas de la ruta del robot e iniciar el ciclo de trabajo; así como también, el robot genera señales de sonido y luz para identificar inicio o fin del ciclo y errores que puedan presentarse en el proceso.

La interfaz HMI cuenta con: switch on/off como muestra la Figura 20, teclado matricial 4x4 como indica la Figura 21, pantalla LCD 16x2 como muestra la Figura 22, buzzer e indicadores luminosos como muestra la Figura 23.



Figura 20. switch on/off



Figura 21. Teclado matricial 4 x 4 de membrana



Figura 22. Pantalla LCD 16X 2



Figura 23. Buzzer Zumbador Activo



Figura 24. Diodo Led redondo 5 nm Alto Brillo

2.1.6.8 Sistema de alimentación:

Las fuentes de alimentación utilizadas son baterías Li-Po (Litio y Polímero), son baterías recargables de gran duración, gran capacidad de almacenamiento de energía y una baja tasa de descarga. Estas características hacen de las baterías lipo una buena opción de alimentación de energía para el robot.

2.1.6.8.1 Consumo energético:

Para la selección de las baterías utilizadas por el robot se debe hacer el cálculo de consumo energético de los emisores de rayos UV-C, los motores y del sistema de control.

2.1.6.8.1.1 Consumo emisión UV-C:

Las luces UV-C están conectadas a través de un balasto que sus características de funcionamiento son 12V y 2 A

$$I_{balastos\ UV-C} = 2 * 2[A]$$

$$I_{balastos\ UV-C} = 4[A]$$

Agregando un factor de seguridad de 25% la corriente consumida es:

$$I_{balastos\ UV-C} = 1.25 * 4[A]$$

$$I_{balastos\ UV-C} = 5[A]$$

2.1.6.8.1.2 Consumo de motores:

Las características de los motores en funcionamiento bajo condiciones de carga son 12 V y 1.7 A

$$I_{motores} = 2 * 1.7[A]$$

$$I_{motores} = 3.4 [A]$$

Agregando un factor de seguridad de 25% la corriente consumida es:

$$I_{motores} = 1.25 * 3.4[A]$$

$$I_{motores} = 4.25[A]$$

2.1.6.8.1.3 Consumo del sistema de control:

El consumo energético del sistema de control incluye a todos los elementos de la interfaz HMI, los sensores y la tarjeta de Arduino.

Cargas de cada elemento:

$$I_{Instrumentación} = I_{driver} + 2I_{encoder} + 4I_{ultrasónico} + I_{LCD} + I_{teclado} + I_{buzzer} + 2I_{leds}$$

$$I_{Instrumentación} = [36 + 2 * 20 + 4 * 15 + 25 + 24 + 25 + 2 * 10] [mA]$$

$$I_{Instrumentación} = 230 [mA]$$

Cargas totales del sistema de control:

$$I_{control} = I_{Instrumentación} + I_{arduino}$$

$$I_{control} = 230 [mA] + 500 [mA]$$

$$I_{control} = 730 [mA]$$

Agregando un factor de seguridad de 25% la corriente consumida es:

$$I_{control} = 1.25 * 730[mA]$$

$$I_{control} = 912.5[A]$$

2.1.6.8.2 Selección de baterías:

Tabla 7. Características de baterías

Descripción	Consumo esperado	Voltaje de funcionamiento
$I_{balastos\ UV-C}$	5[A]	12[V]
$I_{motores}$	4.25[A]	12[V]
$I_{control}$	912.5[mA]	5[V] – 10[V]

El robot de desinfección UV-C tendrá una autonomía de 1h y la capacidad de la batería está determinada por:

$$Ab[h] = \frac{\text{capacidad de la batería [Ah]}}{\text{consumo esperado [A]}}$$

$$\text{capacidad de la batería [Ah]} = Ab[h] * \text{consumo esperado [A]}$$

La capacidad necesaria para la batería del sistema de rayos UV-C es:

$$Cap. Bateria_{balastosUV-C} [Ah] = 1[h] * 5 [A]$$

$$Cap. Bateria_{balastosUV-C} = 5[Ah]$$

La capacidad necesaria para la batería de los motores es:

$$Cap. Bateria_{motores} [Ah] = 1[h] * 4.25 [A]$$

$$Cap. Bateria_{motores} [Ah] = 4.25[Ah]$$

La capacidad necesaria para la batería del sistema de control es:

$$Cap. Bateria_{control} [mAh] = 1[h] * 912.5 [mA]$$

$$Cap. Bateria_{control} = 912.5[mAh]$$

Para el Sistema de rayos UV-C y el Sistema de motores se usa una sola batería de 10Ah. Es recomendable utilizar la batería LiPo Turnigy 10000mah 4s 14.8v 12c Drone Robotica Rc como muestra en la Figura 25.



Figura 25. Bateria LiPo Turnigy 10000 mah 4s 14.8v 12c Drone Robotica Rc

Para el sistema de control se usa una batería de 1Ah. Es recomendable utilizar la batería LiPo Turnigy 1000mah 3s 11.1v Robot 20c como muestra en la Figura 26.



Figura 26. Bateria LiPo Turnigy 1000 mah 3s 14.8v 11.1c Drone Robotica 20c

2.1.6.9 Esquema de conexiones electrónicas:

En la Figura 27 se observa el esquema de conexiones de todo el sistema electrónico para el correcto funcionamiento del robot.

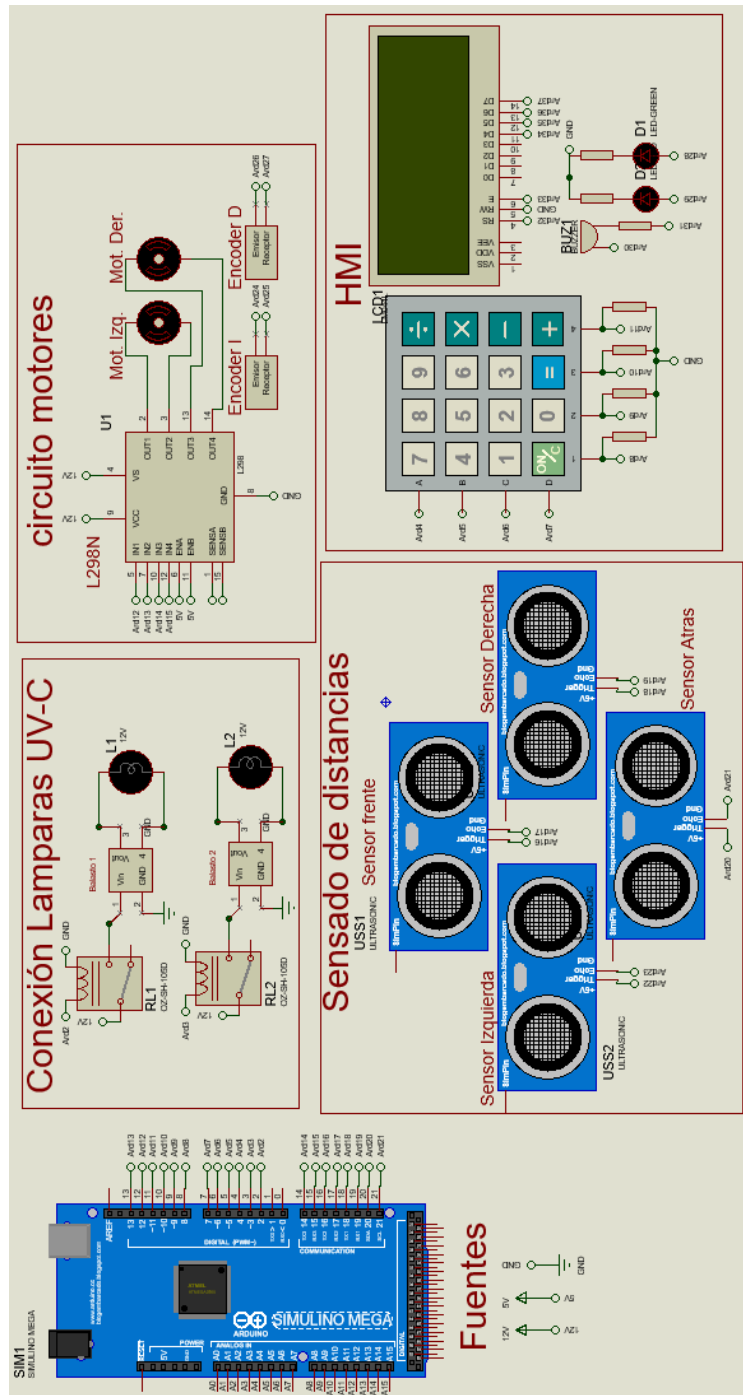


Figura 27. Esquema Eléctrico del robot

2.1.7 DISEÑO DE CONTROL.

2.1.7.1 Flujograma de control.

El ciclo de funcionamiento del robot está dividido en 4 etapas principales:

La etapa inicial consta del encendido manual del robot, el reconocimiento de distancia mínima del robot hacia cualquier objeto (20 cm) y el ingreso anualmente de los comandos que definen la trayectoria que va hacer el robot. La siguiente etapa va a ser la de ejecución. En esta etapa el robot acciona el sistema de desinfección (lámpara UV-C) y recorre automáticamente la trayectoria ingresada anteriormente.

Cuando el robot finaliza la trayectoria comienza la etapa final donde el robot apaga las luces UV-C e indica mediante indicadores luminosos y de sonido que ha finalizado.

Existe una última etapa, la de error, dicha etapa se puede activar en cualquier momento de ejecución de las anteriores etapas. Esta etapa se activa cuando la trayectoria del robot está próxima a chocarse contra un objeto.

En la Figura 28 se describe mediante un flujograma el ciclo de funcionamiento del robot:

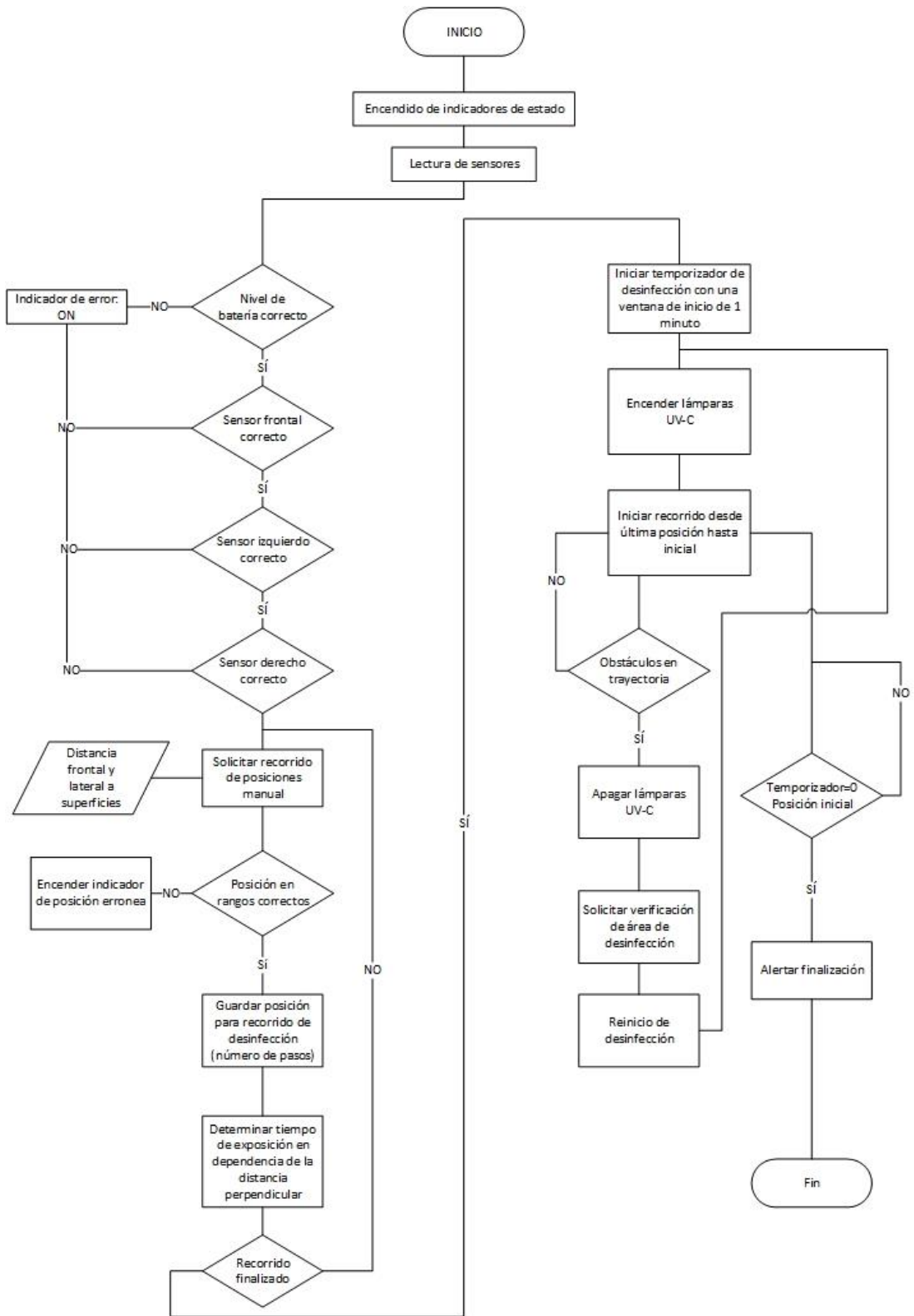


Figura 28. Diagrama de flujo del robot móvil de desinfección

2.1.7.2 Control tipo PID de los actuadores.

Antes de sacar el controlador de forma matemática, primero, hay que encontrar el modelo matemático del actuador.

2.1.7.2.1 Modelo matemático del actuador

El sistema de actuación consta de dos partes, el motor DC, y una caja reductora de velocidad compuesta por un tren de engranajes.



Figura 29. Motor 6DCD-15-30

Para obtener el modelo del movimiento del rotor se analiza mediante la ecuación de Lagrange,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \sum_i \tau_i(t) \quad (19)$$

Para lo cual también es necesario escribir el lagrangiano

$$L = T - U \quad (20)$$

Donde:

" θ " Es posición angular del eje del rotor.

" U " Es la energía potencial en el rotor.

" T " Es la energía cinética de rotación.

Si se asume que el rotor no presenta ninguna deformación ($k=0$) entonces Ecuación 21, de la energía potencial es:

$$U = \frac{1}{2}k * \theta^2 = 0 \quad (21)$$

La energía cinética de rotación está definida por la Ecuación 22:

$$T = \frac{1}{2}J * \theta'^2 \quad (22)$$

Si se reemplaza las Ecuaciones 21 y 22 en la Ecuación 20 del Lagrangiano se obtiene:

$$L = T - U = \frac{1}{2}J * \theta'^2 - 0 = \frac{1}{2}J * \theta'^2 \quad (23)$$

Al desarrollar la Ecuación 19 con los valores de la Ecuación 23 se tiene:

$$J * \theta''(t) - 0 = \sum_i \tau_i(t) \quad (24)$$

El torque total está descrito mediante la Ecuación 24:

$$\sum_i \tau_i = \tau_{elec} + \tau_{mec} \quad (25)$$

Donde:

τ_{elec} Es el torque que genera el motor debido a sus procesos electrodinámicos,
 τ_{mec} Es el torque generado por fuerzas externas al motor.

Para el análisis se considera que el motor esta sin carga y que la fuerza de rozamiento es nula, por lo tanto $\tau_{mec} = 0$ por lo que la Ecuación 25 queda representada en:

$$\sum_i \tau_i = \tau_{elec} \quad (26)$$

Entonces al igualar las Ecuaciones 24 y 25 se obtiene:

$$J * \theta''(t) = \tau_{elec} \quad (27)$$

El torque eléctrico es directamente proporcional a la fuerza electromotriz (*fem*) que actúa sobre circuito del motor U_{cv} .

$$\tau_{elec} = \alpha_1 U_{cv} \quad (28)$$

Donde:

α_1 – constante de proporcionalidad.

En el momento inicial el torque total es igual al torque de arranque τ_{st} (torque de arranque)

$$\tau_{st} = \alpha_1 U_{ctrl} \quad (29)$$

Donde:

U_{ctrl} – fuerza electromotriz de la fuente de energía. Al momento del arranque solo esta fuerza actuará sobre el circuito del motor.

Debido al movimiento del rotor, en las bobinas se genera una fuerza electromotriz de inducción \mathcal{E} contraria a U_{ctrl} , y en magnitud es directamente proporcional a la velocidad angular.

$$\mathcal{E}(\omega) = \alpha_2 \omega \quad (30)$$

Donde:

α_2 – constante de proporcionalidad.

Por lo tanto, la *fem* U_{cv} que circula por el circuito del motor será igual a:

$$U_{cv} = U_{ctrl} - \mathcal{E}(\omega) \quad (31)$$

Si se reemplaza en la Ecuación 31 las Ecuaciones 28, 29 y 30 el torque eléctrico se determina como una función de la velocidad ω

$$\tau_{elec} = \tau_{st} - \alpha_1 \alpha_2 \omega \quad (32)$$

Cuando $\omega = \omega_{nls}$, $\tau_{elec} = 0$. Si reemplazamos estos valores en la Ecuación 32 es posible determinar el valor de la constante $k = \alpha_1\alpha_2$ mediante la siguiente expresión:

$$0 = \tau_{st} - \alpha_1\alpha_2 \omega_{nls}$$

$$k = \alpha_2\alpha_2 = \frac{\tau_{st}}{\omega_{nls}} \quad (33)$$

Los valores están representados en la Tabla 8 a continuación, basada en el catálogo de DC Motors de donde se escogieron los actuadores del robot

- U_{ctrl} → Voltaje de alimentación (Voltage)[V].
 ω_{nls} → Velocidad sin carga (No load speed) [RPM].
 I_{nls} → Corriente sin carga (No load speed) [mA].
 τ_{st} → Torque de arranque (Starting Torque)[N*cm].
 I_{st} → Corriente de arranque (Starting Current) [A].
 J → Momento de inercia del rotor [$Kg.m^2$].

Tabla 8. Catálogo de DC Motors

U_{ctrl} V	ω_{nls} RPM	I_{nls} A	τ_{st} N.m	I_{st} A	J $Kg.m^2$
12	32.4	0.6	0.370	13.5	0.0023

Si se reemplaza los valores de la Tabla 8 en la Ecuación 33 se obtiene el valor de la constante k.

$$k = \alpha_2\alpha_2 = \frac{\tau_{st}}{\omega_{nls}} = \frac{0.37 [N.m]}{32.4 [RPM]}$$

$$k = \frac{0.37 [N.m]}{32.4 \left[\frac{rev}{m}\right]} * \left[\frac{1}{60s} * \frac{1}{\frac{2 * (\pi)rad}{rev}} \right]$$

$$k = 0.109 \left[\frac{kg * m^2}{rad * s} \right]$$

Con estos valores se obtienen la curva mecánica del motor:

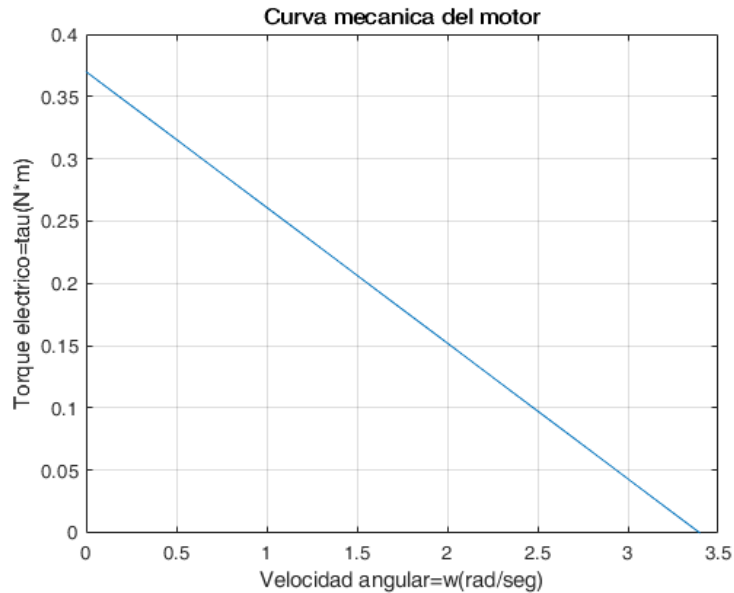


Figura 30. Torque vs Velocidad del motor

El comportamiento lineal de la curva mecánica del motor como indica en la Figura 30 permite hacer una aproximación para modelar el motor como un sistema de primero orden.

$$G(s) = \frac{k_{gain}}{T_m s + 1} \quad (34)$$

Si se considera la Ecuación 27, es posible escribir la Ecuación 32 como una ecuación diferencial que describe la variación de la velocidad angular del rotor con respecto al tiempo:

$$J\dot{\omega} = \tau_{st} - k\omega; \quad t_0 = 0, \omega(0) = 0$$

Sacando Laplace queda:

$$Jsw(s) = \frac{\tau_{st}}{s} - kw(s) \rightarrow w(s)(JS + k) = \frac{\tau_{st}}{s} \rightarrow w(s) = \frac{\frac{\tau_{st}}{s}}{(JS + k)}$$

$$w(s) = \frac{\tau_{st}}{S(JS + k)}$$

Fracciones parciales:

$$w(s) = \frac{\tau_{st}}{S(JS + k)} = \frac{A}{(JS + k)} + \frac{B}{S}$$

$$\frac{\tau_{st}}{S(JS + k)} = \frac{A * S + B(JS + k)}{S(JS + k)} \implies A = -\frac{\tau_{st} * J}{k}; B = \frac{\tau_{st}}{k}$$

$$\frac{A}{(JS + k)} + \frac{B}{S} \rightarrow w(s) = \frac{-\frac{\tau_{st} * J}{k}}{(JS + k)} + \frac{\tau_{st}}{kS} \rightarrow w(s) = -\frac{\tau_{st} * J}{k(JS + k)} + \frac{\tau_{st}}{kS}$$

$$w(s) = -\frac{\tau_{st} * J}{kJS + k^2} + \frac{\tau_{st}}{kS} \rightarrow \text{multiplicar (todo) por } \frac{1}{kJ}: w(s) = -\frac{\frac{\tau_{st}}{k}}{S + \frac{k}{J}} + \frac{\tau_{st}}{kS}$$

$$\rightarrow w(s) = -\frac{\tau_{st}}{k} * \frac{1}{S + \frac{k}{J}} + \frac{\tau_{st}}{k} * \frac{1}{S}$$

→ sacar laplace inv:

$$w(t) = -\frac{\tau_{st}}{k} * e^{-\frac{kt}{J}} + \frac{\tau_{st}}{k}$$

$$w(t) = \frac{\tau_{st}}{k} (1 - e^{-\frac{kt}{J}}) \quad (34)$$

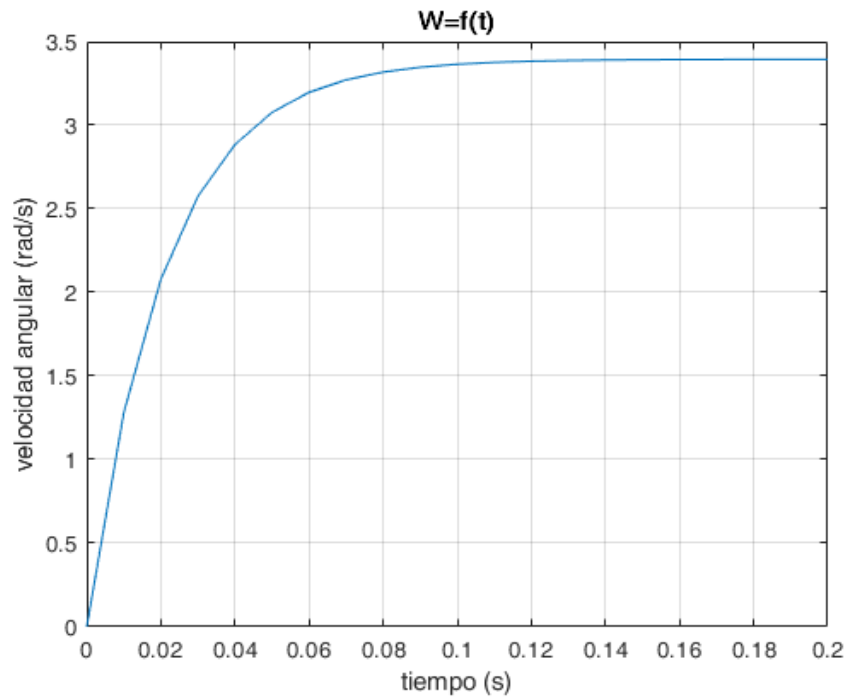


Figura 31. Velocidad angular en función del tiempo.

La Ecuación 34 representa el comportamiento de la curva de velocidad del motor DC al aplicar el voltaje de control (12 V), la cual se muestra en la Figura 31.

Con el fin de determinar La función de transferencia que caracteriza al motor DC, es necesario determinar la constante de tiempo (T_m) y la ganancia (k_{gain}) del motor.

T_m está descrita por la Ecuación 35:

$$T_m = \frac{J\omega_{nls}}{\tau_{st}} \quad (35)$$

$$T_m = \frac{0.0023[\text{Kg} * \text{m}^2] * 3.4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]}{0.37 [\text{N} * \text{m}]} = 0.0211 [\text{s}]$$

Cuando el voltaje es U_{ctrl} , se considera que se alcanza ω_{nls} , por lo tanto, la ganancia (k_{gain}) del sistema se determina mediante la Ecuación 36:

$$k_{gain} = \frac{\omega_{nls}}{U_{control}} \quad (36)$$

$$k_{gain} = \frac{3.4 \left[\frac{rad}{s} \right]}{12[V]} = 0.283 \left[\frac{V \cdot rad}{s} \right]$$

Al remplazar en la Ecuación 34 los resultados obtenidos en las Ecuaciones 35 y 36 queda definida la función de transferencia del motor DC

$$G(s) = \frac{0.283}{0.0211 \cdot s + 1} \quad (37)$$

Ahora se ingresa la Ecuación 37 en el software de simulación de Matlab, Simulink dando como resultado la curva de la Figura 32.

Modelo Matemático

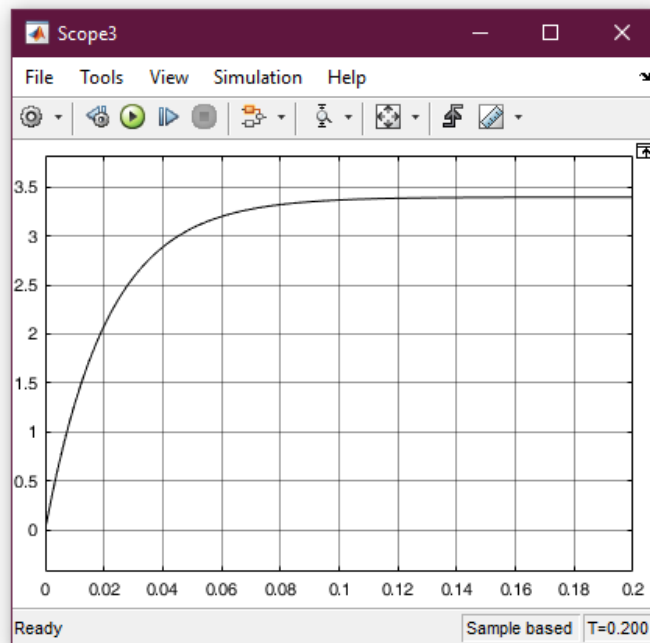
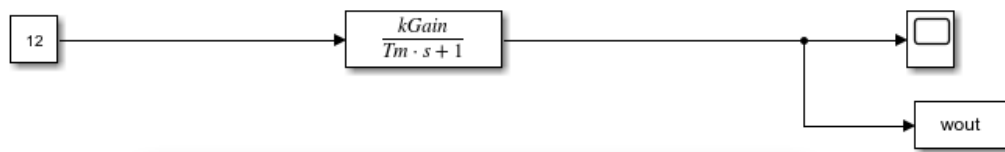


Figura 32. Curva de la Función de transferencia del motor DC

Gracias a las Figuras 31 y 32 se puede concluir que tanto la ecuación diferencial como la función de transferencia del sistema, correspondientes a las Ecuaciones 34 y 37 tienen el mismo comportamiento en su curva de velocidad angular en función del tiempo.

2.1.7.3 Sistema de control

Para el control de movimiento del robot es necesario que las ruedas se muevan con la misma velocidad. Para lograr este objetivo, es necesario diseñar el sistema de control de los actuadores del robot.

El modelo del motor DC puede ser analizado como un sistema de primer orden, entonces el control de velocidad puede realizarse mediante la estrategia PI.

El controlador PI elimina el error de estado estacionario con la constante (K_i) además de modificar la respuesta transitoria mejorando el amortiguamiento y reduciendo el sobrepaso máximo con la parte proporcional (K_p).

El tiempo de establecimiento en lazo abierto es de 0.1 s aproximadamente. Con el controlador PI se busca reducir este tiempo mínimo a la mitad ($t_s \leq 0.05$ s).

A de más se desea tener el mínimo pico de velocidad posible, debido a la inercia del robot, permitiendo un máximo pico del 12 por ciento ($M_p \leq 12\%$).

El sistema de control está descrito por el siguiente diagrama de bloques:

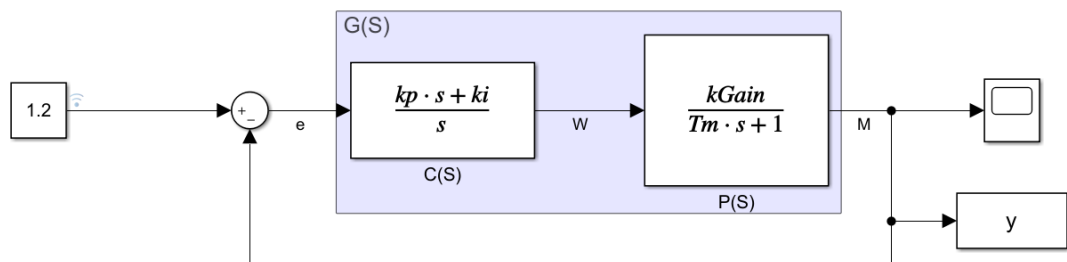


Figura 33. Sistema de control de velocidades del motor DC

Al desarrollar el diagrama de bloques de la Figura 33 se tiene como resultado una función de transferencia que representa al sistema de control es:

$$G(s)_{LC} = \frac{\frac{kGain(kp*s+ki)}{s}}{s^2 + \frac{s(1+kGain.kp)}{Tm} + \frac{kGain.ki}{Tm}} \quad (38)$$

Si se observa la Ecuación 38 se puede ver que es una función de transferencia de segundo orden de la forma:

$$G(s) = \frac{Wn^2}{s^2 + 2*\delta*Wn*s + Wn^2} \quad (39)$$

Para poder definir los valores Kp y Ki del controlador es necesario hacer el cálculo de los siguientes parámetros δ y Wn :

$$\delta = -\frac{\text{Ln } Mp}{\sqrt{\pi^2 + (\text{Ln } Mp)^2}} \rightarrow \delta = -\frac{\text{Ln } 0.12}{\sqrt{\pi^2 + (\text{Ln } 0.12)^2}} \rightarrow \delta = 0.56 \quad (40)$$

$$ts(2\%) = \frac{4}{\delta * Wn} \rightarrow Wn = \frac{4}{\delta * ts} \rightarrow Wn = \frac{4}{0.56 * 0.05} \rightarrow Wn = 142.86 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (41)$$

Al evaluar el polinomio característico de la Ecuación 38 con el de la Ecuación 39 se tiene:

Al evaluar S^2 :

$$1 = 1$$

Al evaluar S^1 :

$$\frac{(1+kGain.kp)}{Tm} = 2 * \delta Wn \rightarrow kp = \frac{2.\delta.Wn.Tm-1}{kGain} \quad (42)$$

Si se reemplaza los valores obtenidos en las Ecuaciones 40 y 41 en la Ecuación 42 se obtiene:

$$kp = 8.4$$

Al evaluar S^0 :

$$\frac{kGain.ki}{Tm} = Wn^2 \rightarrow ki = \frac{Tm * Wn^2}{kGain} \quad (43)$$

Si se reemplaza los valores obtenidos en la Ecuación 41 en la Ecuación 43 se obtiene:

$$ki = 1521.66$$

Ahora bien, al implementar los valores de las constante k_p y k_i la curva del sistema de control es:

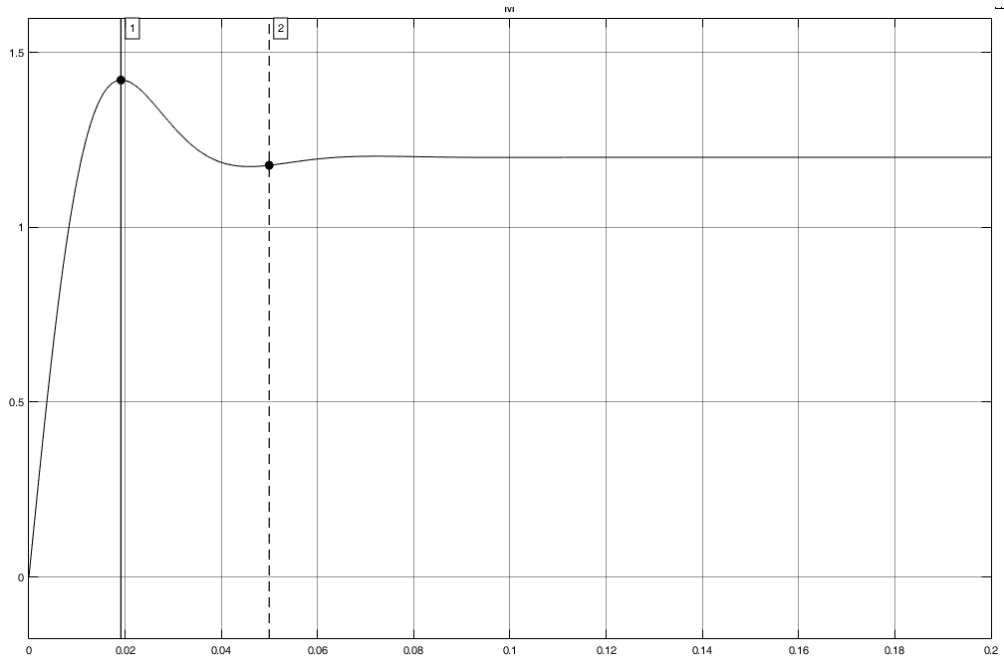


Figura 34. Respuesta del sistema con el controlador

Como se puede observar en la Figura 34 el tiempo de establecimiento t_s si cumple con los requerimientos, pero el máximo pico tiene un valor mayor al permitido por lo que se reajusta los valores del controlador con métodos de prueba y error; con lo cual se han definido los valores en:
 $K_p=8.4$.

$K_i=410$.

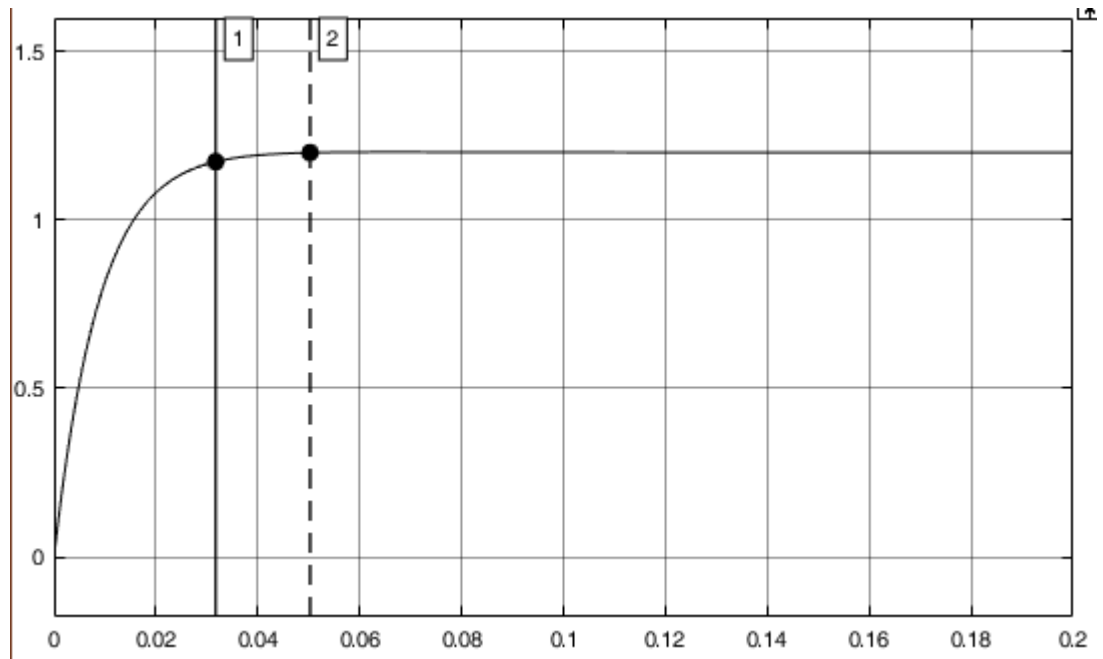


Figura 35. Respuesta del sistema con el controlador reajustado

Como se puede observar en la Figura 35 cumple con el tiempo de establecimiento del sistema y el máximo pico permitido.

2.1.3 Control de Movimiento del robot:

Es la parte del sistema que permitir controlar tanto la posición como orientación del robot.

2.1.3.1 Control de posición del robot:

Es la parte del sistema que permitir controlar tanto la posición como orientación del robot.

2.1.3.2 Cinemática directa del robot

Se refiere al conjunto de ecuaciones que permiten calcular los valores de posición y orientación del robot de desinfección.

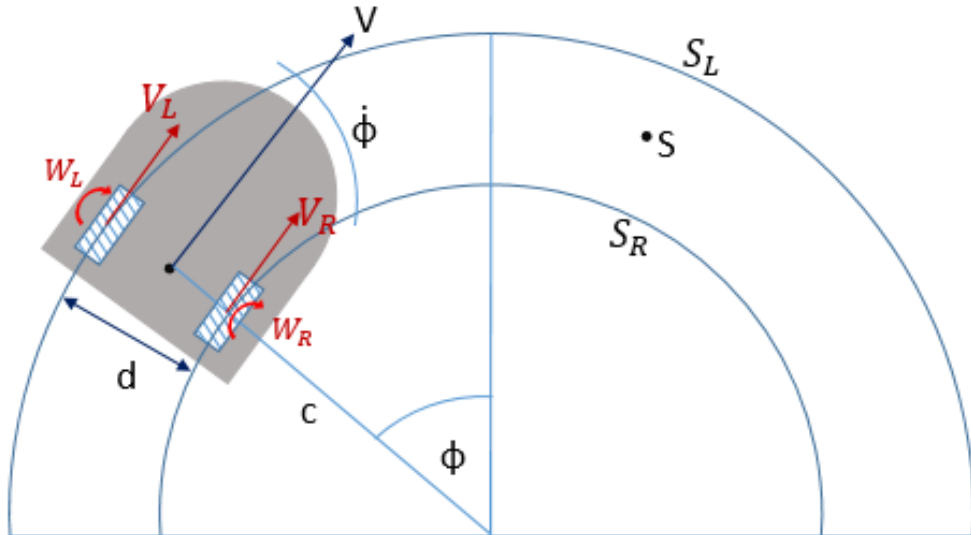


Figura 36. Diagrama para el cálculo cinemático de trayectoria de movimiento.

En la Figura 36 se observa el diagrama de relaciones cinemáticas del robot, donde:

d -Distancia entre las ruedas del robot.

c -Es el radio de giro medido desde el centro del robot hasta el centro instantáneo de rotación.

Φ -Ángulo de giro.

W_L, W_R -Velocidad angular de la rueda izquierda y rueda derecha.

V_L, V_R -Velocidad lineal de la rueda izquierda y rueda derecha.

V -Velocidad lineal del robot.

Φ' -Velocidad angular del robot.

S_L, S_R -Desplazamiento de la rueda izquierda y rueda derecha.

S -Desplazamiento del Robot.

Para el análisis se considera que las ruedas del robot y sus encoders son similares. Con lo cual, si se sabe el desplazamiento de cada una de las ruedas, el desplazamiento del robot se determina mediante:

$$S = \frac{S_L + S_R}{2} \quad (44)$$

Para determinar el ángulo de giro φ se determina mediante:

$$\varphi = \frac{S_L - S_R}{d} \quad (45)$$

Si se conoce la posición angular de las ruedas θ_L y θ_R , mediante un censado (encoder) se tiene:

$$S_L = 2\pi r \cdot \theta_L \quad (46)$$

$$S_R = 2\pi r \cdot \theta_R \quad (47)$$

Al se reemplaza la Ecuaciones 46 y 47 en la Ecuación 44 se tiene:

$$S = \frac{2\pi r \cdot \theta_L + 2\pi r \cdot \theta_R}{2} \quad (48)$$

Si reemplaza la Ecuaciones 46 y 47 en la Ecuación 45 se tiene:

$$\varphi = \frac{2\pi r \cdot \theta_L - 2\pi r \cdot \theta_R}{d} \quad (49)$$

La velocidad del robot esté determinada mediante la derivada de la Ecuación 48:

$$v = S' = \pi r (\theta'_L + \theta'_R) \quad (50)$$

La componente de la velocidad en el eje x estará determinada por el coseno del ángulo φ de la Ecuación 49 y el módulo de la velocidad de la Ecuación 50:

$$v_x = \pi r (\theta'_L + \theta'_R) \cdot \cos\left(\frac{2\pi r \cdot \theta_L - 2\pi r \cdot \theta_R}{d}\right) \quad (51)$$

La componente de la velocidad en el eje y estará determinada por el seno del ángulo φ de la Ecuación 49 y el módulo de la velocidad de la Ecuación 50:

$$v_y = \pi r (\theta'_L + \theta'_R) \cdot \sin\left(\frac{2\pi r \cdot \theta_L - 2\pi r \cdot \theta_R}{d}\right) \quad (52)$$

2.1.3.3 Control del movimiento del robot.

Los análisis previos han sido orientados al control de velocidades de los actuadores del robot. En esta sección se analiza el robot como un conjunto para poder obtener los movimientos necesarios y llegar a un destino deseado.

2.1.3.3.1 Generación del modelo mecánico 3D para pruebas:

Se ha modelado el robot móvil en un programa de modelado 3D SolidWorks, para posteriormente importarlo en el software de Matlab (simulink), como se muestra en la Figura 37.

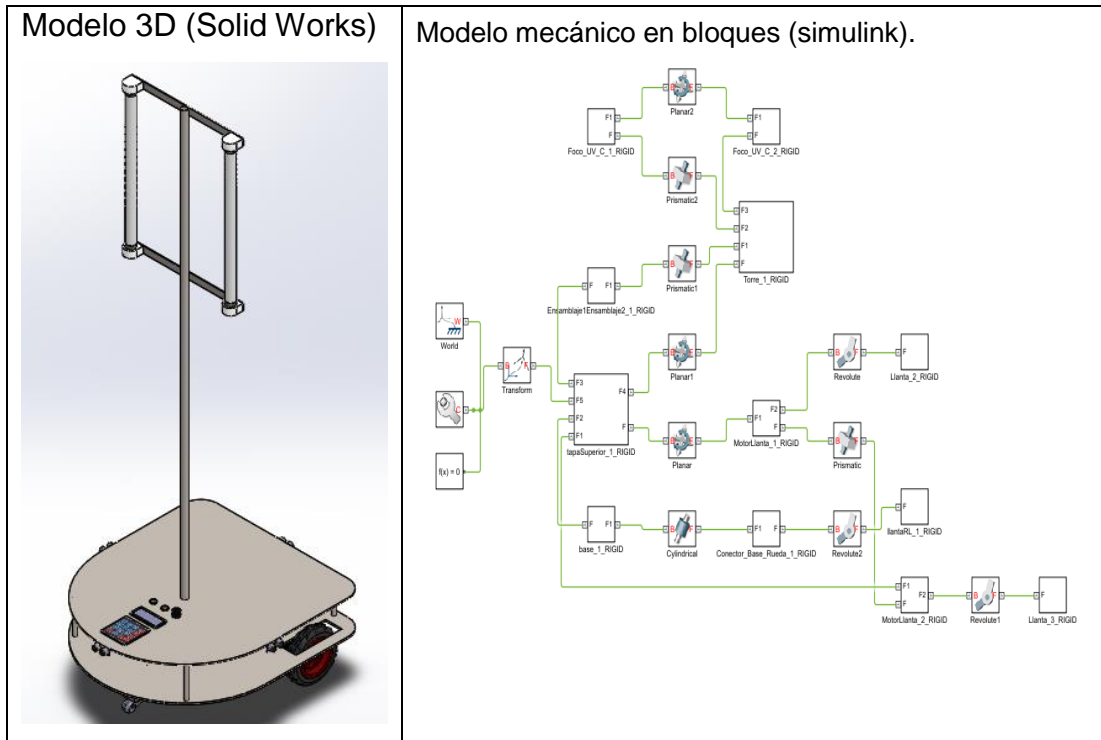


Figura 37. Modelado 3D del robot exportado a Simulink.

Al implementar la cinemática directa permite la simulación del desplazamiento del robot, en este caso, se implementa mediante digrama de bloques tomando en cuenta las Ecuaciones 49, 50, 51 y 52 como lo muestra la Figura 38:

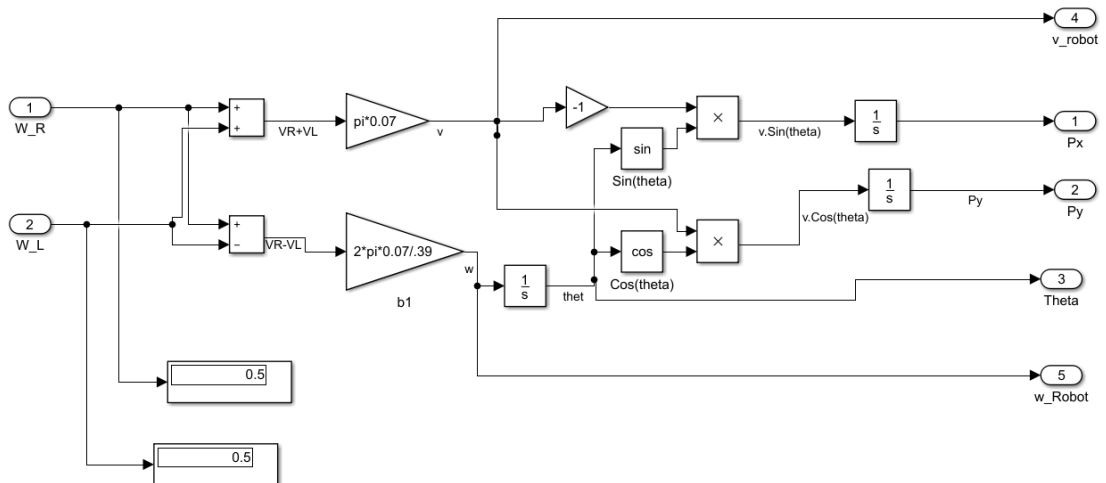


Figura 38. Cinemática directa del robot de desinfección.

A continuación, se hizo algunas pruebas para ver la respuesta del modelo del robot móvil:

Si las dos ruedas se mueven a la misma velocidad angular ($W_D=0.5$, $W_I=0.5$):

Si la rueda Izquierda es más rápida que la rueda derecha ($W_D=0.5$, $W_I=1$):

Si la rueda derecha es más rápida que la rueda izquierda ($W_D=1$, $W_I=0.5$):

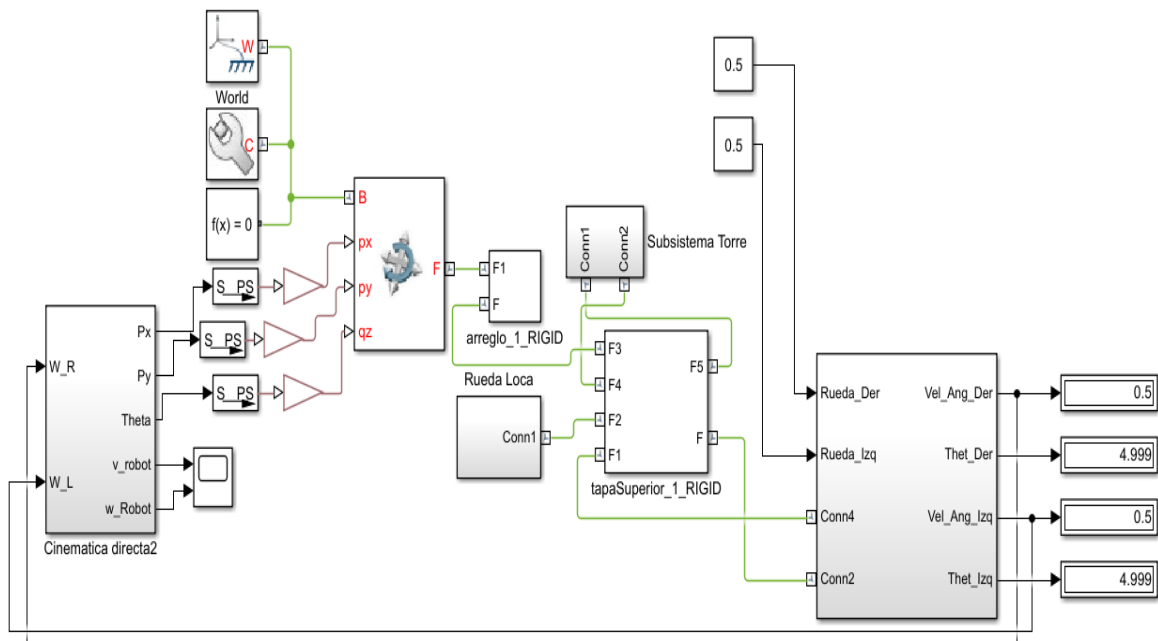


Figura 39. Modelo Cinemático del Robot.

2.2.4. Protocolo de Prueba.

Para el robot de desinfección se procede a evaluar cuatro parámetros que intervienen en el flujo de funcionamiento del mismo: el ingreso de comandos que definen la trayectoria de robot, el desplazamiento adecuado del robot, el sensado de objetos a su alrededor y salto de alarma.

Prueba 1 Comandos ingresados por el HMI.

- Para esta prueba se ingresan varios comandos que definen la trayectoria del robot, y se busca que el sistema refleje dicha trayectoria.

Prueba 2 Comando de movimiento del robot.

- Se ingresa un comando de movimiento, un valor para ese comando y se busca observar la ruta que ejecuta el robot, y el tiempo de ejecución.

Prueba 3 Movimiento del robot que responde a los comandos ingresados por el HMI.

- Se ingresa los comandos de las 3 comprobaciones hechas en la prueba 1, con la diferencia de que el paro será solamente de 15 segundos.

Prueba 4 Simulación de desinfección de consultorio médico.

- Mediante el HMI se ingresa los comandos necesarios para la desinfección de un consultorio Médico y se ejecuta la simulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para comprobar que el sistema tenga el funcionamiento adecuado se procede a hacer la evaluación de los parámetros presentes en el flujo de funcionamiento de robot; movimiento lineal, giro y paro, además del encendido de las lámparas UV-C.

3.1.1. Comandos ingresados por el HMI.

Mediante la interfaz HMI se ingresan manualmente los comandos que contienen los parámetros de movimiento, estos contemplan tanto el tipo de movimiento, como el valor para el comando a ejecutar, tomando en cuenta el signo del valor, siendo negativo cuando se desplaza en reversa o el giro es en sentido horario.

La prueba 1 se realizará 3 veces con diferentes combinaciones de comandos, estas combinaciones de movimientos se obtuvieron de espacios físicos hospitalarios y responden a una desinfección adecuada de dicho espacio.

Tabla 9. Comandos de pruebas HMI

Espacio.	Valor	Tipo de Movimiento (numero que lo representa)	Posición en el vector	Vecor Valor	Vector Comando
Pasillo	2 m	Lineal (1)	1	[2, -3, -1, 5, 90]	[1, 2, 1, 0, 2]
	-30 °	Giro (2)	2		
	-1 m	Lineal (1)	3		
	5 min	Paro (0)	4		
	90 °	Giro (2)	5		
Habitación	-1 m	Lineal (1)	1	[-1, 5, 2, 90, 0.5]	[1, 0, 1, 2, 1]
	5 min	Paro (0)	2		
	2 m	Lineal (1)	3		
	90 °	Giro (2)	4		
	0.5 m	Lineal (1)	5		
Baño	-90 °	Giro (2)	1	[-90, -1.5, 120, 1, 0.2]	[2, 1, 2, 1, 1]
	-1.5 m	Lineal (1)	2		
	-120 °	Giro (2)	3		
	1 m	Lineal (1)	4		
	0.2 m	Lineal (1)	5		

En la Tabla 9 se muestra los comandos de interés con los cuales el algoritmo trabaja internamente, dando como resultado los vectores de valor y de comando.

Al seleccionar el botón “Ejecutar” el programa guarda los vectores “Vector Comando” y “Vector Valor” dentro de su ejecución interna. Para poder visualizarlo se ha hecho un espacio donde el programa recorre dichos vectores y muestra la lista de comandos ingresados como se muestra en la Figura 40, Figura 41 y Figura 42.

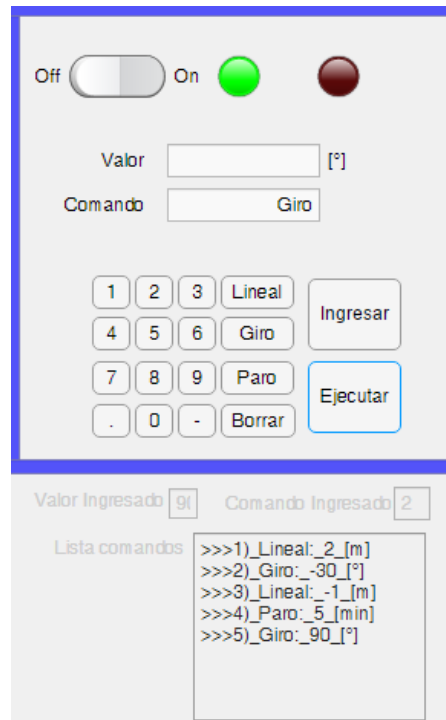


Figura 40. Comandos de prueba HMI pasillo.

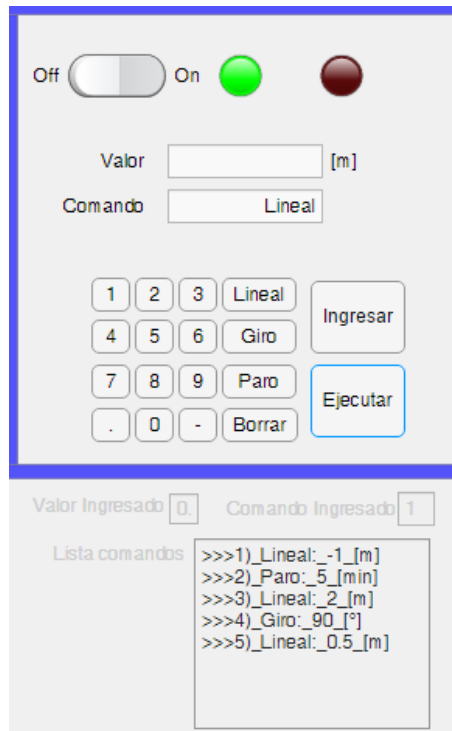


Figura 41. Comandos de prueba HMI habitación.

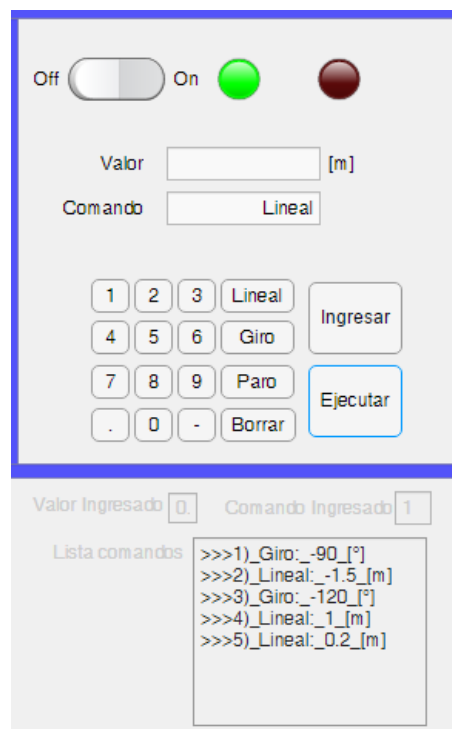


Figura 42. Comandos de prueba HMI baño.

Como se observa los valores ingresados por teclado se almacenan de una forma ordenada para su ejecución.

3.1.2. Comando de movimiento del robot.

Esta prueba consiste en observar el funcionamiento básico de cada tipo de movimiento del robot, en el cual se evalúa desplazamiento, giro y tiempo en la ejecución de cada comando.

Se ingresa un tipo de movimiento, un valor para ese comando y se busca observar la ruta que ejecuta el robot, y su tiempo de ejecución.

1. Desplazamiento de 1 m, lineal hacia adelante.

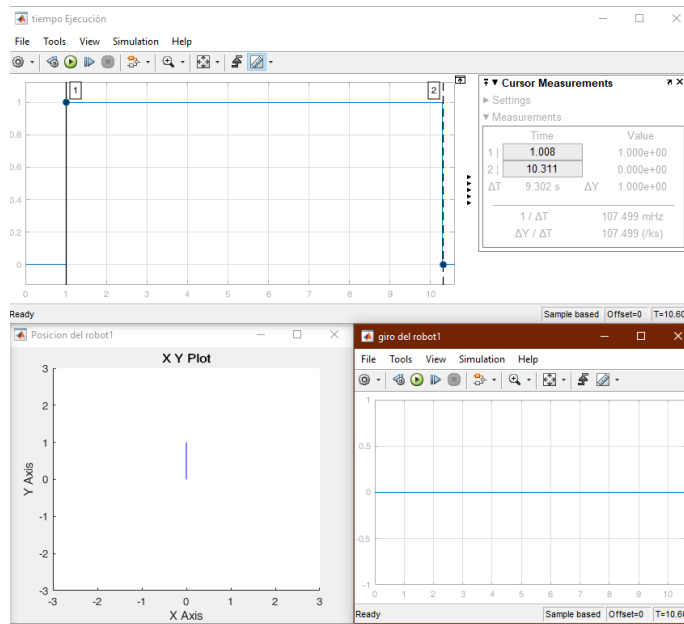


Figura 43. Movimiento lineal hacia adelante.

2. Desplazamiento de 1, lineal hacia atrás.

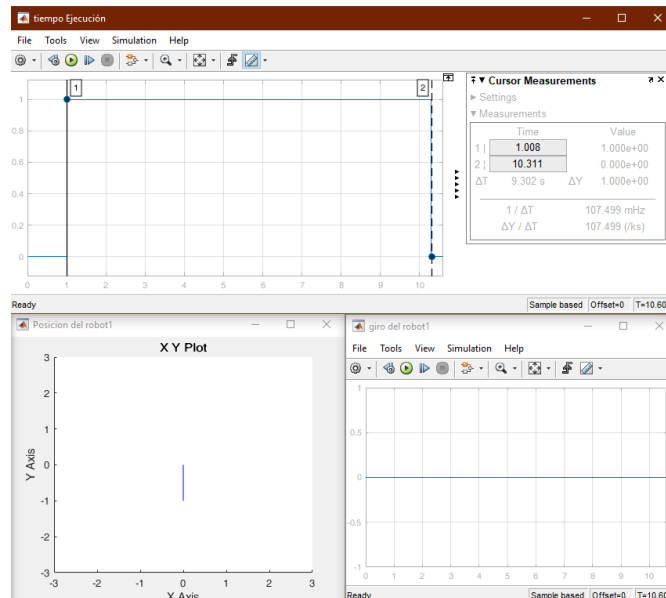


Figura 44. Movimiento lineal hacia atrás.

3. Giro de 90 °, sentido horario.

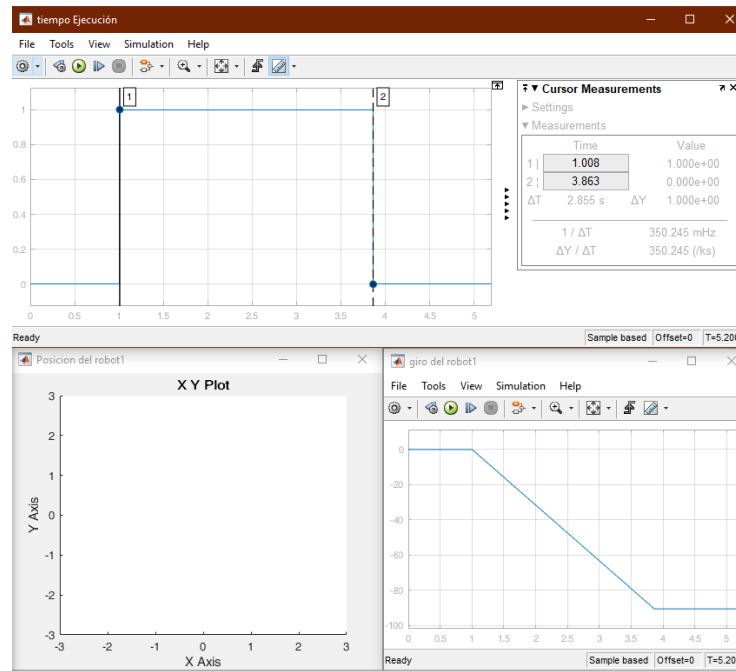


Figura 45. Giro sentido horario.

4. Giro de 90 °, sentido antihorario.

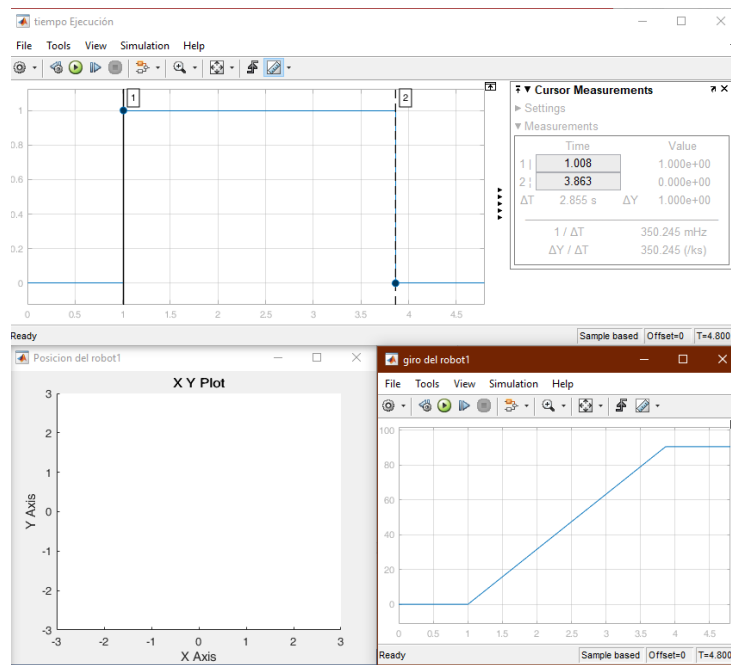


Figura 46. Giro sentido antihorario.

5. Paro de 15 sec.

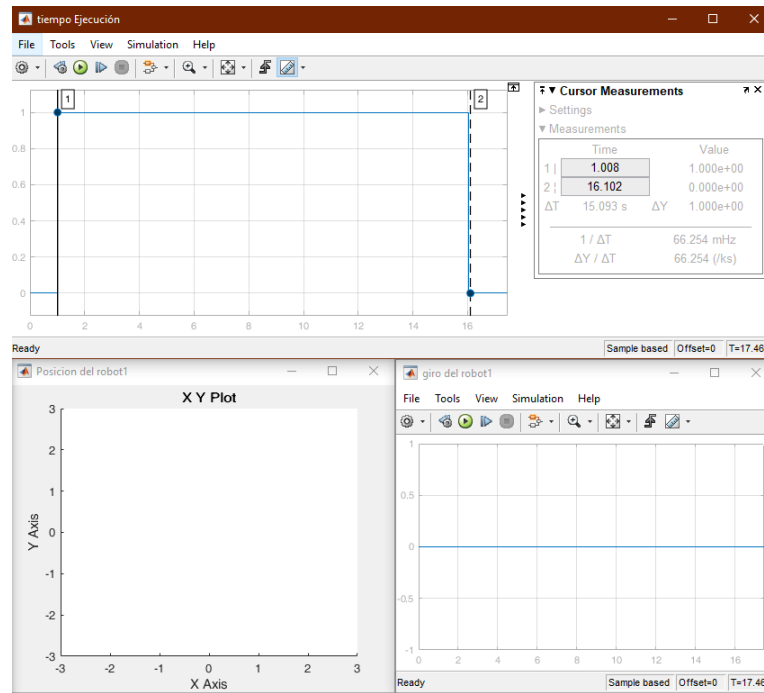


Figura 47. Paro del robot

En las Figuras 43, 44, 45, 46 y 47 se observa el cumplimiento de cada comando en el cual se comprueba su desplazamiento, giro, paro y tiempo de ejecución.

Tabla 10. Comandos de prueba de movimiento del robot

N°	Lista de comandos	Valor	Tipo de Movimiento (numero que lo representa)	Tiempo Teórico	Tiempo de Simulación	Error Porcentual
1	Lineal hacia delante	1 m	1	10 seg	9.3 seg	7,53%
2	Lineal hacia atrás	-1 m	1	10 seg	9.3 seg	7,53%
3	giro de horario	-90 °	2	3 seg	2.9 seg	3,45%
4	Giro antehorario	90 °	2	3 seg	2.9 seg	3,45%
5	Paro	15 seg	0	15 seg	15.1 seg	0,66%

La Tabla 10 evidencia la diferencia entre el tiempo teórico con el tiempo de simulación. Cabe recalcar que el tiempo de simulación es el que representa el tiempo en procesar la información del algoritmo de programación para cumplir con el requerimiento de movimiento.

3.1.3. Movimiento del robot que responde a los comandos ingresados por el HMI.

Con la finalidad de comprobar que los comandos ingresados en la prueba 1 se ejecutan de manera adecuada y responde al movimiento correcto se realiza esta prueba.

La entrada para la prueba 3 son los vectores establecidos en la Tabla 9 donde se busca observar la ruta que ejecuta el robot, y su tiempo de ejecución.

Simulación Pasillo:

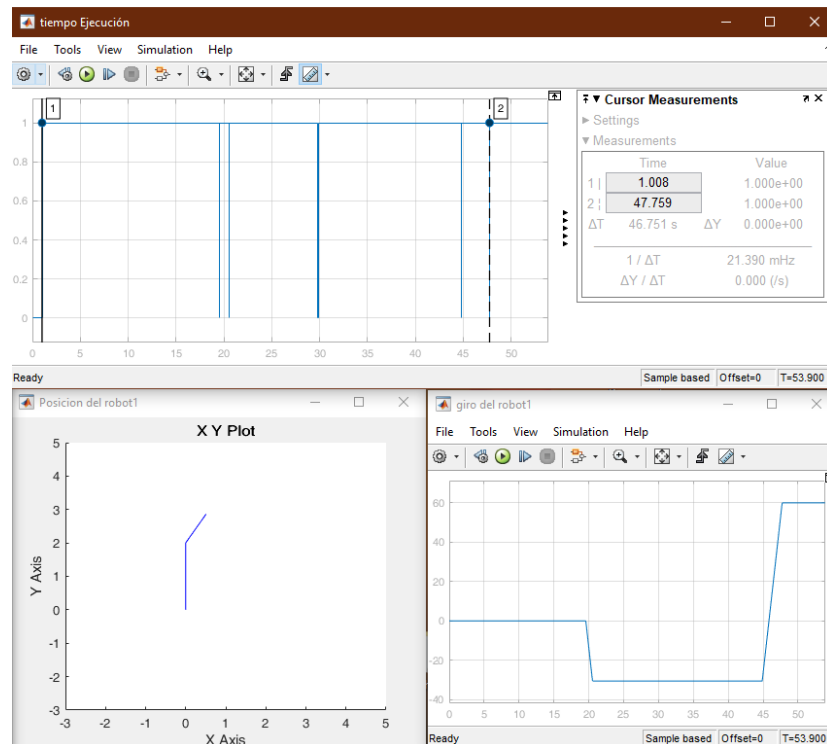


Figura 48. Simulacion de desplazamiento del robot en el pasillo.

Simulación Habitación:

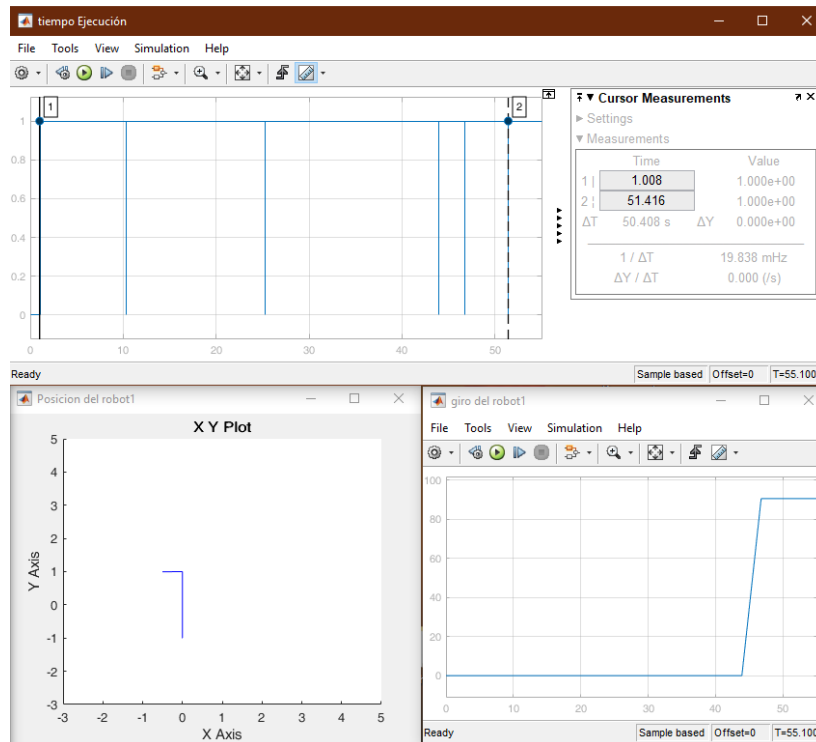


Figura 49. Simulacion de desplazamiento del robot en la habitación

Simulación Baño:

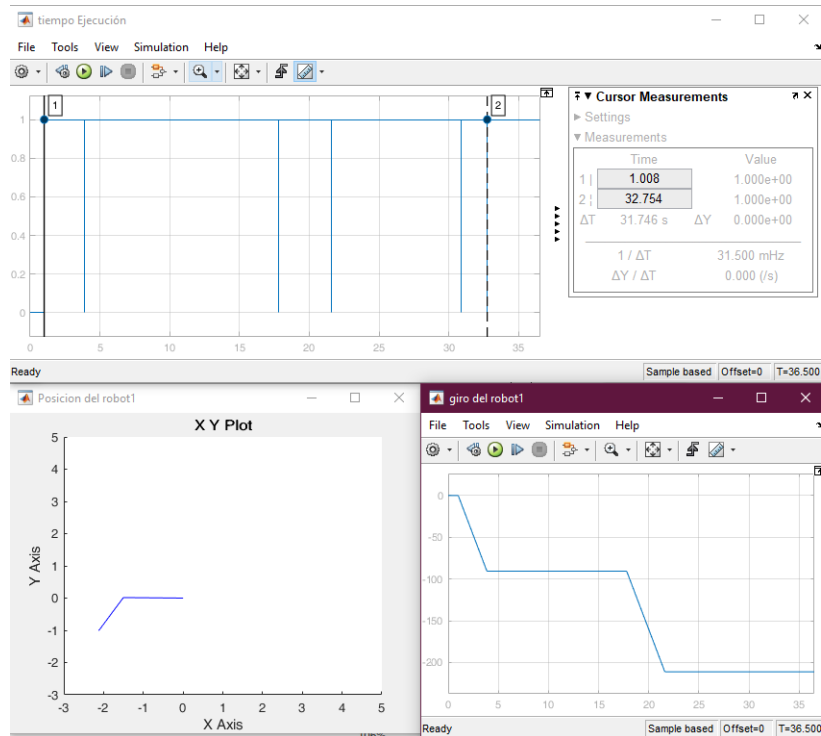


Figura 50. Simulacion de desplazamiento del robot en el baño

En las Figuras 48, 49 y 50 se comprueba el movimiento que corresponde a los comandos que se establece en la Tabla 11. En el cual también se establece el tiempo transcurrido en cada una de sus trayectorias.

Tabla 11. Comandos para la desinfección en espacio hospitalario

Espacio.	Posición en el vector	Valor	Tipo de Movimiento (numero que lo representa)	Vecor Valor	Vector Comando	Tiempo Teórico	Tiempo de simulación	Error Porcentual
Pasillo	1	2 m	Lineal (1)	[2, -3, -1, 5, 90]	[1, 2, 1, 0, 2]	49 seg	46.8 seg	4,70%
	2	-30 °	Giro (2)					
	3	-1 m	Lineal (1)					
	4	15 seg	Paro (0)					
	5	90 °	Giro (2)					
Habitación	1	-1 m	Lineal (1)	[-1, 5, 2, 90, 0.5]	[1, 0, 1, 2, 1]	53 seg	50.4 seg	5,16%
	2	15 seg	Paro (0)					
	3	2 m	Lineal (1)					
	4	90 °	Giro (2)					
	5	0.5 m	Lineal (1)					
Baño	1	-90 °	Giro (2)	[-90, -1.5, 120, 1, 0.2]	[2, 1, 2, 1, 1]	34 seg	31.8 seg	6,92%
	2	-1.5 m	Lineal (1)					
	3	-120 °	Giro (2)					
	4	1 m	Lineal (1)					
	5	0.2 m	Lineal (1)					

3.1.4. Simulación de desinfección de consultorio médico.

En esta prueba está contemplado la simulación total de la desinfección de un consultorio médico. El proceso comienza con el ingreso manual de la ruta a través del teclado presente en el HMI. Al pulsar el botón de ejecución se generan los vectores que controlan automáticamente los comandos para el robot de desinfección y comienza la desinfección del consultorio médico.

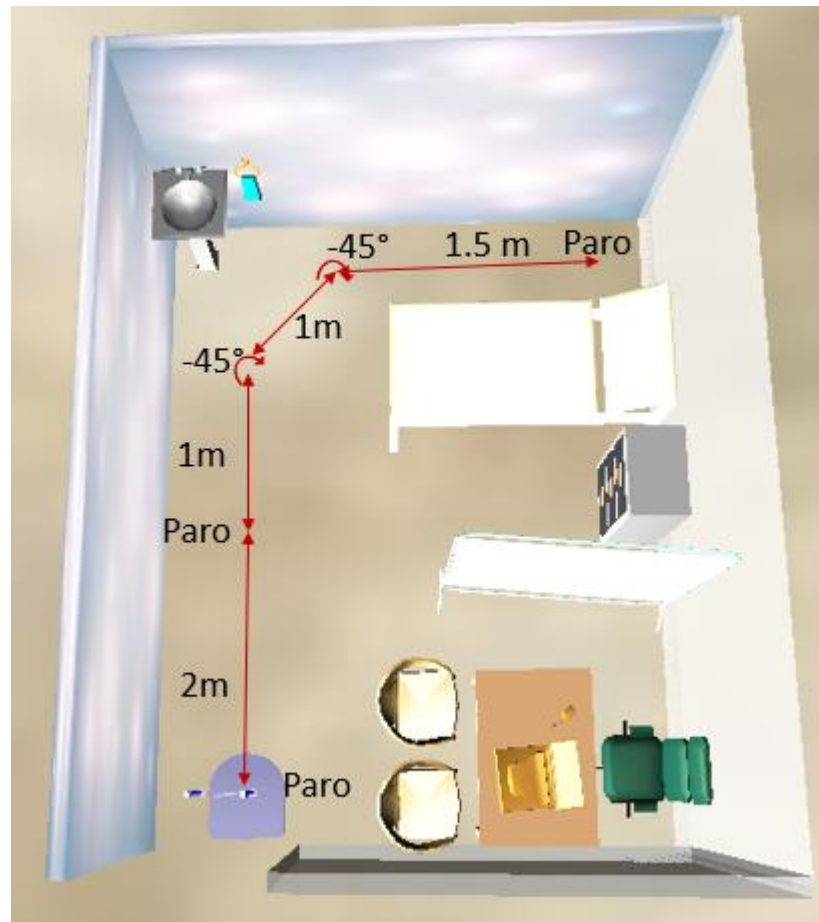


Figura 51. Simulación del consultorio médico en entorno virtual

La ruta que se establece para la desinfección del consultorio médico esta descrita en la Figura 51. La cual se ingresa manualmente en el teclado de la Interfaz HMI como se muestra en la figura 52.

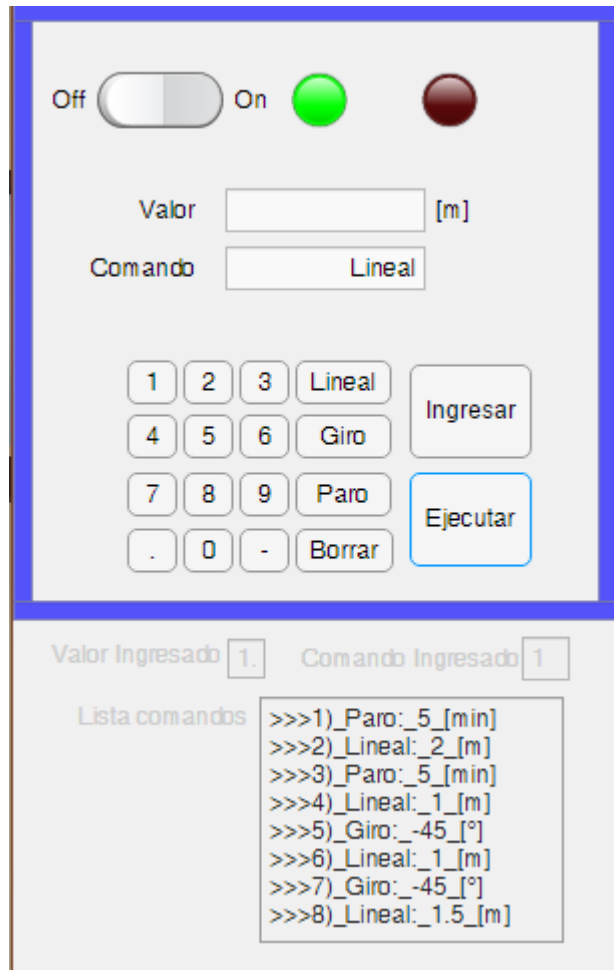


Figura 52. Comando HMI para activación del robot

Al pulsar el botón ejecutar se visualiza los comandos presentes en los vectores y empieza la simulación del proceso de desinfección.

En la Figura 53, se muestra el desplazamiento, giro y tiempo presentes para el cumplimiento de la desinfección del consultorio médico.

El tiempo usado en la simulación para la desinfección total del consultorio es 16 minutos con 50 segundos.

Tomando en cuenta que los puntos de desinfección dentro del consultorio son 3 y que en cada punto el robot hace un paro de 5 min, el tiempo de desplazamiento activo por la habitación de corresponde a 1 minuto con 50 segundos.

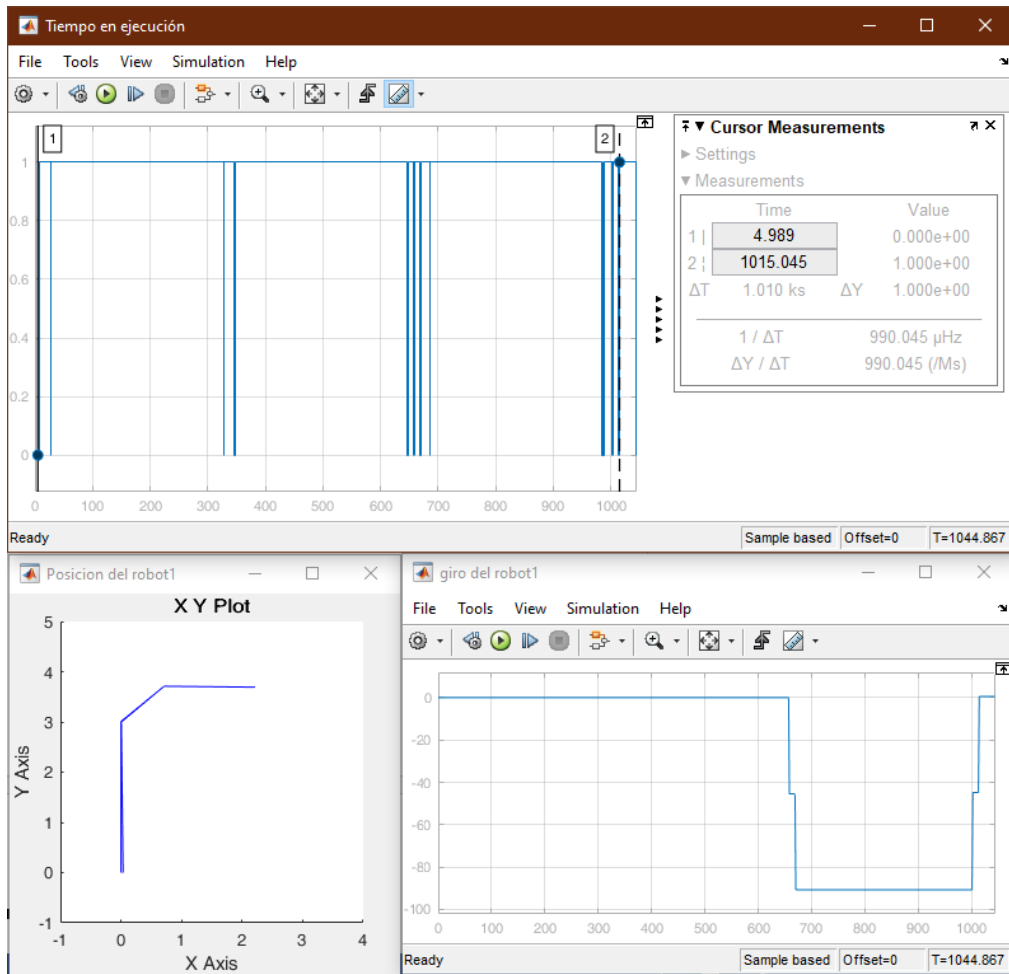


Figura 53. Desplazamiento del robot en el consultorio médico

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se determinó el modelo cinemático de un robot móvil, tipo diferencial, para desinfección de consultorios médicos. Este fue integrado con el modelo realizado en una herramienta CAD con la finalidad de probar los algoritmos planteados. Dicho algoritmo se podría utilizar para realizar pruebas en un prototipo físico.
- El uso de herramientas de simulación permite tener una aproximación cercana al funcionamiento del sistema de desinfección que se usaría en un ambiente real, Pudiendo así tener un estudio de trayectorias y de tiempos en ejecutar la limpieza de diferentes espacios.
- Se validó el modelo mecatrónico de robot móvil semiautónomo para desinfección, a través de software donde se logró visibilizar un modelo CAD del robot, el montaje de un mundo virtual y una simulación del funcionamiento del sistema de desinfección.

RECOMENDACIONES

- Implementar dentro de la simulación un sistema de reconocimiento de superficies expuestas a la luz UV-C para poder obtener la eficiencia del sistema de desinfección asumiendo que todas las superficies que tienen contacto con la luz UV-C tendrán una desinfección del cien por ciento.
- Implementar algoritmos de reconocimiento de entornos y de trayectorias óptimas, para no tener que ingresar las coordenadas manualmente.
- Probar los algoritmos de control del robot con técnicas de “hardware in loop”, para obtener tiempos de procesamiento del microcontrolador usado en una posible implementación de un prototipo físico.

BIBLIOGRAFÍA

- Alciatore, D., & Histan, M. (2008). *Introducción a la Mecatrónica y los sistemas de medición*. McGrawHill Interamericana de España.
- B.M, A., Banrud, H., Boe, E., & Bjordal, O. (2006). Comparison of UV C Light and Chemicals for Disinfection of Surfaces in Hospital Isolation Units. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 729-734.
- Bambino, I. (2008). *Una introducción a los robots móviles*. Obtenido de Asociación Argentina de Control Automático : https://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf
- Baturone, A. O. (2001). Robótica: Manipuladores y robots móviles. *MEMORIASDEL XXIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOIM*, 28-30, 258, 259.
- Boyce, J., & Donskey, C. (2019). Understanding ultraviolet light surface decontamination in hospital rooms: A primer. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 1-6.
- Collazo, J., Gorrosieta, E., Pedraza, J., Villaseñor, U., & Romero, R. G. (2009). Modelación de un robot móvil de dos ruedas con tracción diferencial. *8° Congreso Nacional de Mecatrónica*, 306-309.
- Colomer, R. V. (2013). *Propuesta metodológica en el ámbito de la mecatrónica: vehículos de competición de alta eficiencia*. Valencia: UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA.
- Conti, F. (2005). *Motores paso a paso*. Argentina: ALSINA.
- Cortés, J. F. (2012). Matlab aplicado a robótica y Mecatrónica. 148-170.
- Dhaouadi, A. A. (2013). Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: a unified framework. *Adv Robot Autom. MOMORIAS DEK XIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*.
- Fernández del Busto y Ezeta, R. (2013). *Análisis y diseño de sistemas de control digital*. McGrawHillEducation.
- Fernández, L., Poletta, G., Imhof, A., & Siroski, P. (2013). Efectos de la radiación ultravioleta natural y artificial (UVA/UVB) sobre la concentración plasmática de calcio y fósforo y el crecimiento en crías de *Caiman latirostris*. *InVet*, 75-82.
- FIVER Enviroment Group Co., L. (10 de 9 de 2020). Obtenido de FIVER Enviroment Group Co., Ltd.: <https://www.fivergroup.com/12V-DC-Power-Supply-UV-Ballast-for-15W-367.htm>
- González, J., & Ollero, A. (1996). Estimación de la posición de un robot móvil. *Informática y Automática*, 3-18.
- Hernández, D., Eguibar, J., Cortés, C., & Reyes, J. (2017). Diseño, construcción y modelo dinámico de un robot móvil de tracción diferencial aplicado al seguimiento de trayectorias. *MEMORIAS DEL*

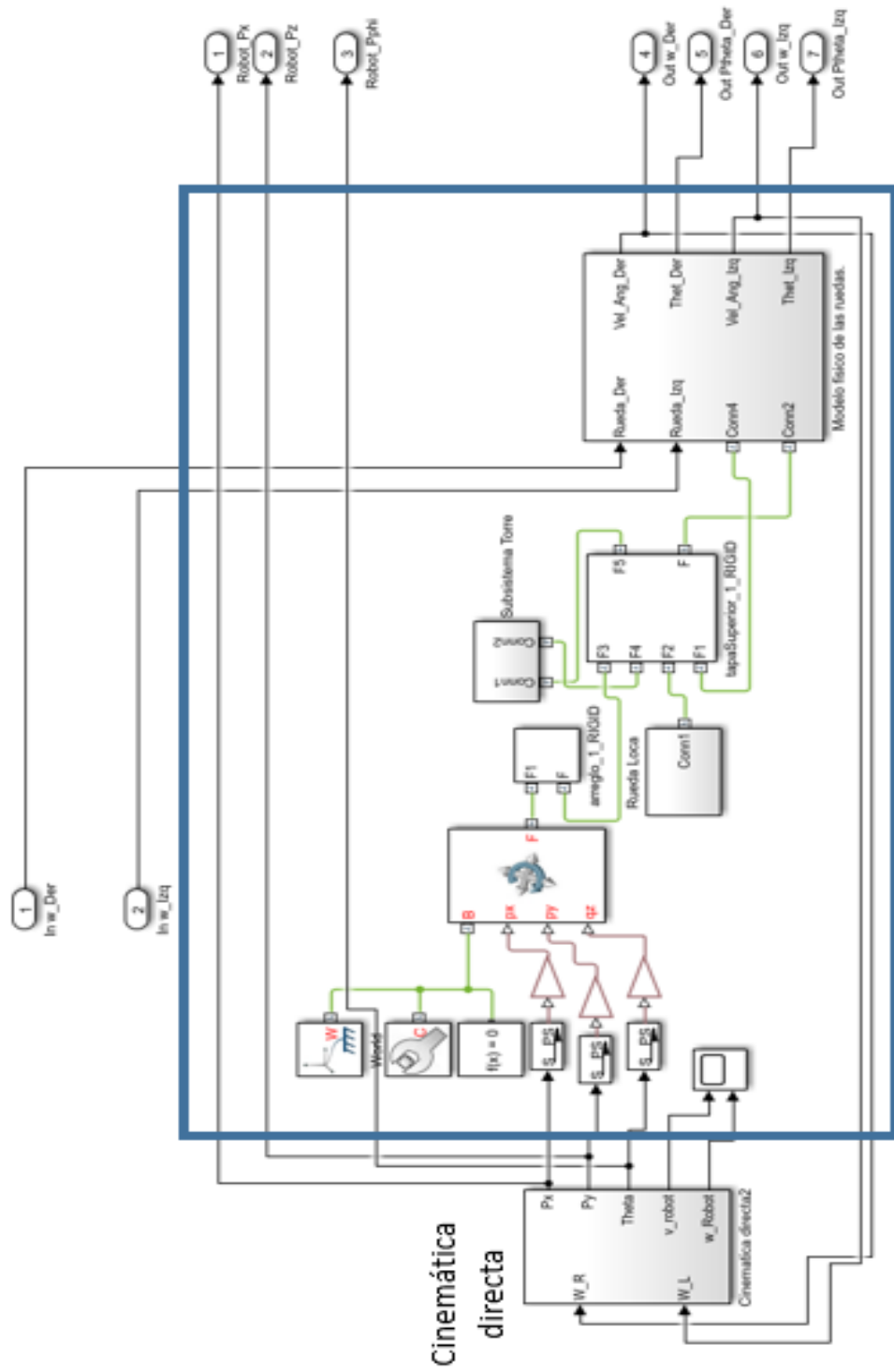
XXIII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, MT 1-MT
7.

- M. Yue, F. T. (2012). Trajectory-tracking control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics with uncertain disturbances. *Applied Artificial Intelligence*.
- Manzocco, L., Da Pieve, S., Bertolini, A., Bartolomeoli, I., Maifreni, M., Vianello, A., & Nicoli, M. C. (2011). Surface decontamination of fresh-cut apple by UV-C light exposure: Effects on structure, colour and sensory properties. *Postharvest Biology and Technology* 61, 165-171.
- Ministerio de Salud Pública. (2015). *Guía de diseño arquitectónico para establecimientos de salud*. Santo Domingo, República Dominicana: KOART, E.I.R.L.
- Mlambo, P., Simango, D., Chiweshe, E., Dera, H., & Jonathan, E. (2017). Methodologies for Mechatronic Systems Design: Attributes and Popularity. *Zimbabwe Journal of Science and Technology*, 123-133.
- Musuña, J., Zapata, B., Oñate, L., & Campusano, G. (2014). Diseño y construcción de un robot móvil que permita la obtención de una nube de puntos del escaneo de habitaciones utilizando láser y webcams. *Ingenius*, 53-61.
- Nerandic, M., Priyaleela, T., Sankar, T., Jencson, A., Cadnum, J., Ray, A., . . . Donskey, C. (2015). Evaluation of a Pulsed Xenon Ultraviolet Disinfection System for. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 192-197.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN. S.A.
- R. Serway, J. J. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 278-296.
- Reed, N. (2010). The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. *Public Health Reports* , 15-27.
- Sánchez, C. J., Arias, E. M., Armenta, P. J., & Salas, S. D. (2012). Luz ultravioleta germicida y control de microorganismos ambientales en hospitales. *Costarr Salud Pública*, 19-22.
- Universidad de Málaga. (2006). Manipulación Manual de Cargas. *Servicio de Prevención de Riesgos Laborales (Sepruma)*, 1-6.

ANEXOS

ANEXO 1

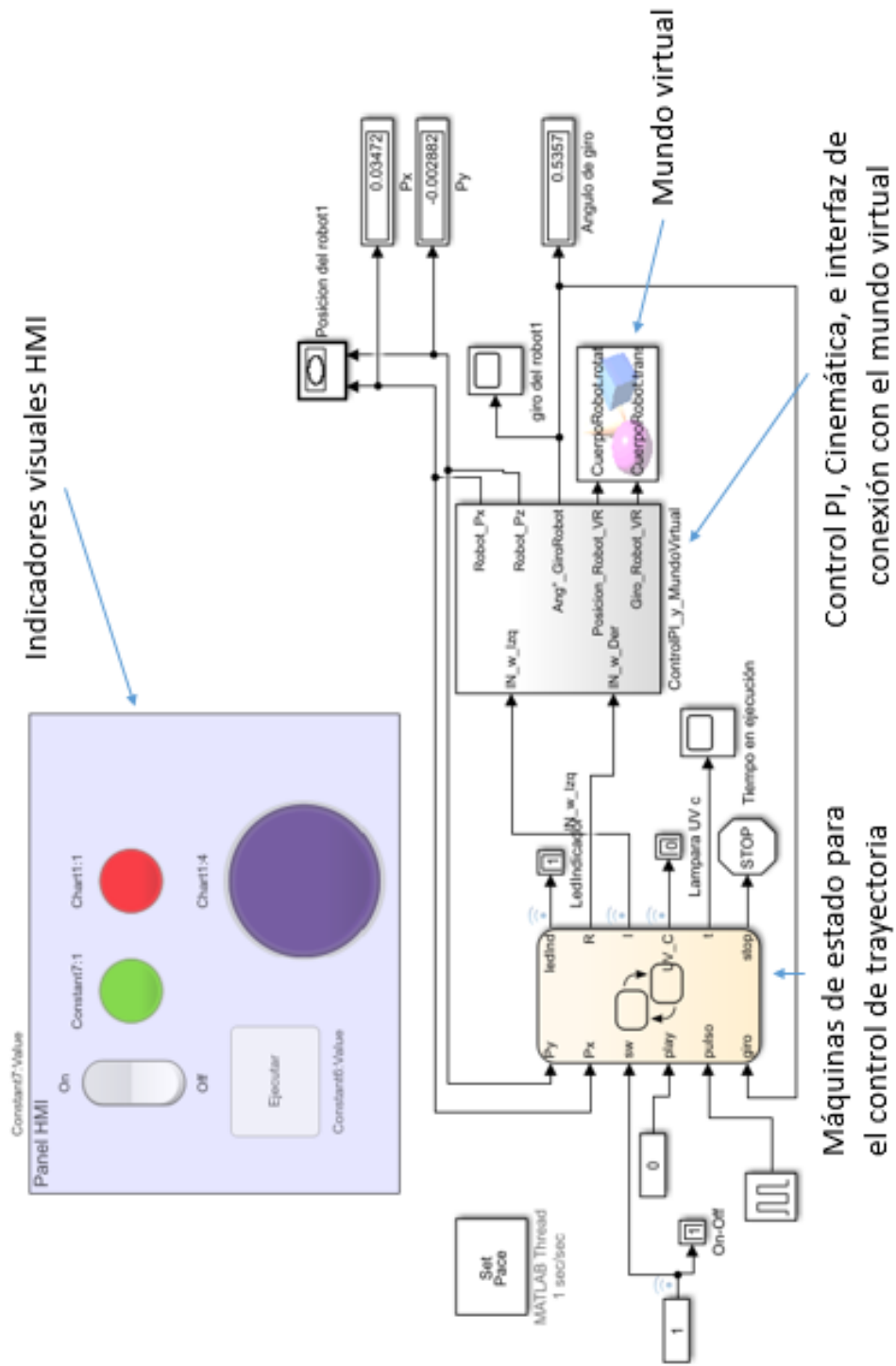
MODELO Y CINEMÁTICA DEL ROBOT



Modelo robot- SimMechanics

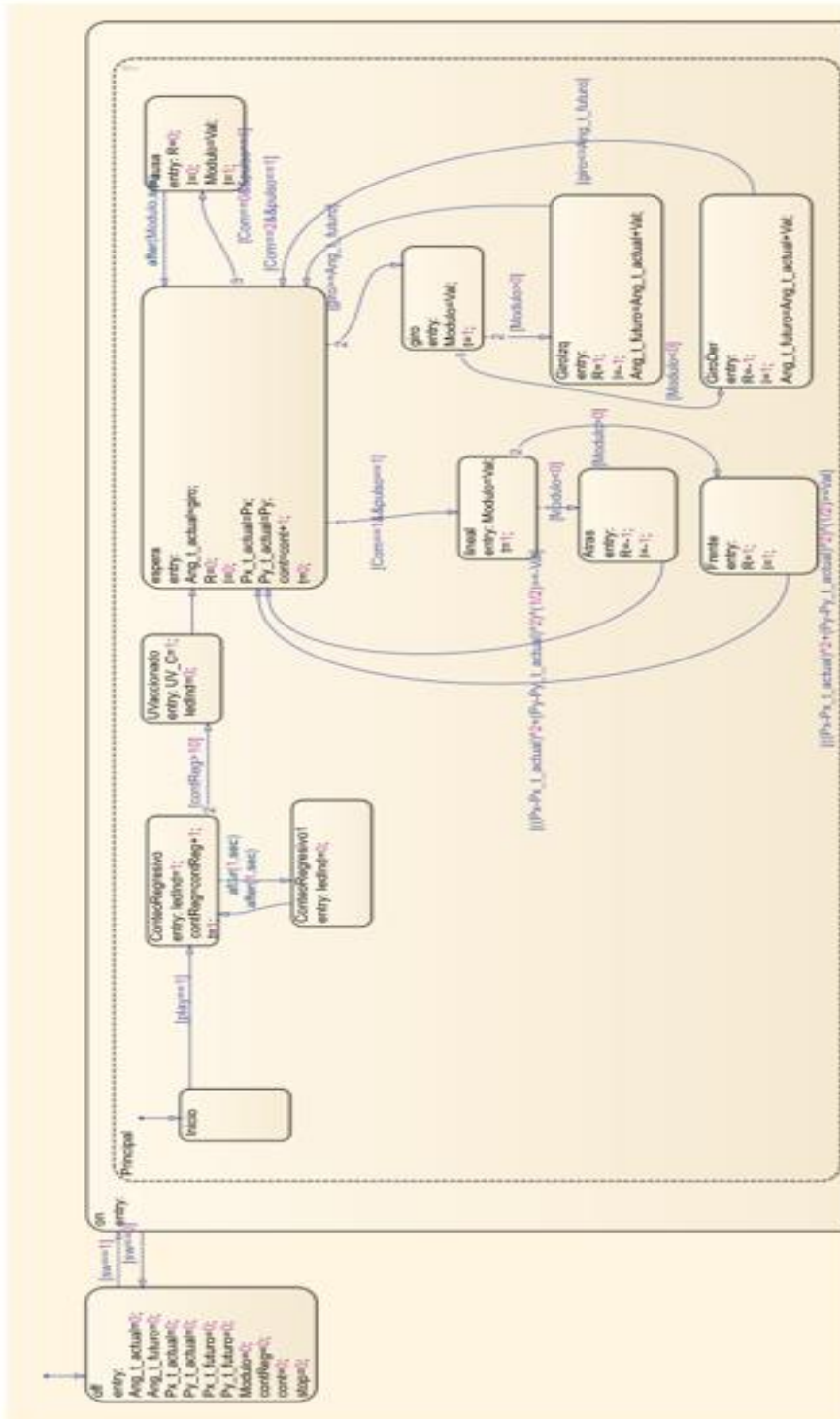
ANEXO 2

PROGRAMA DE SIMULACIÓN



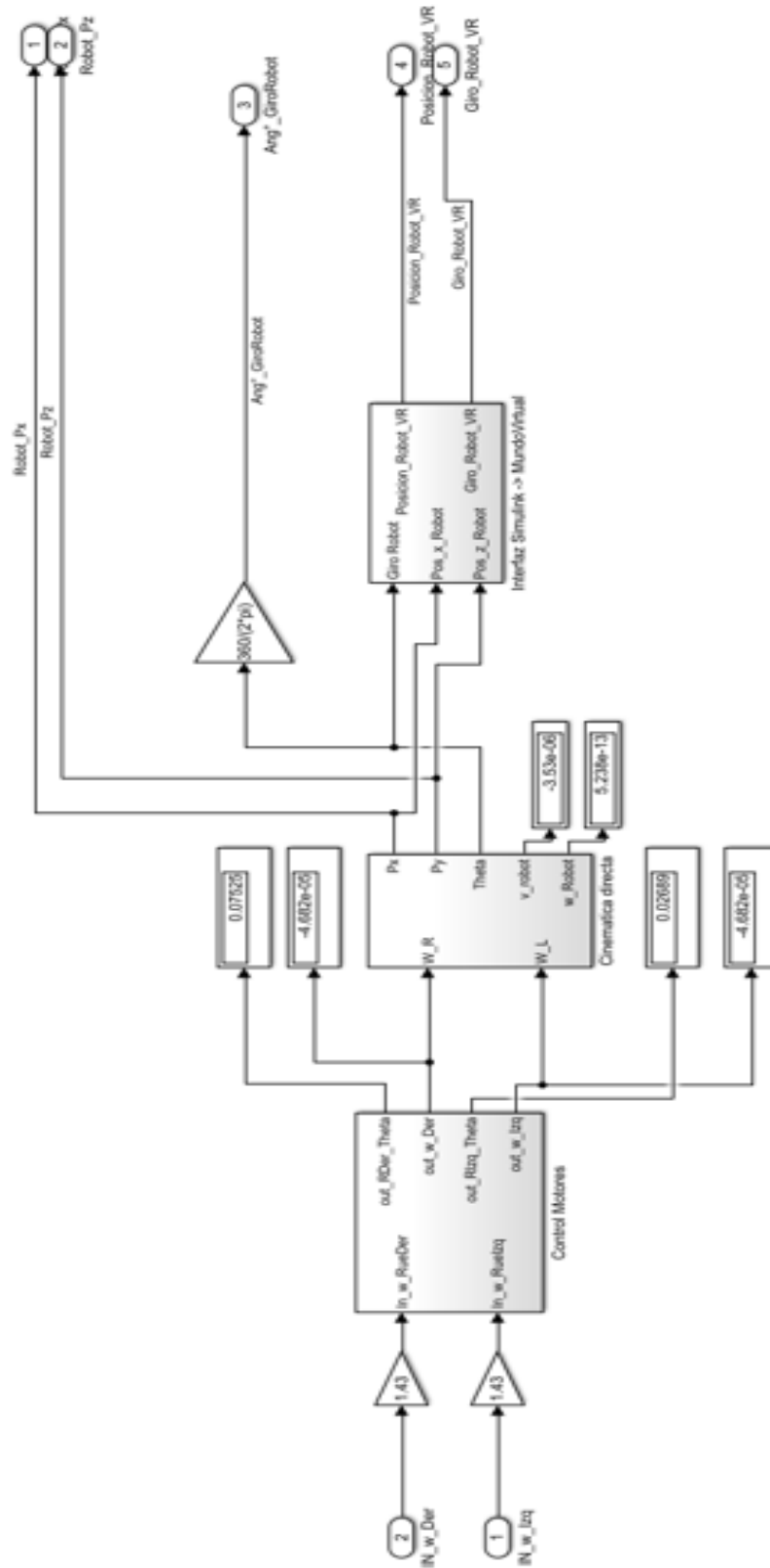
ANEXO 3

MÁQUINAS DE ESTADO PARA EL CONTROL DE TRAYECTORIA

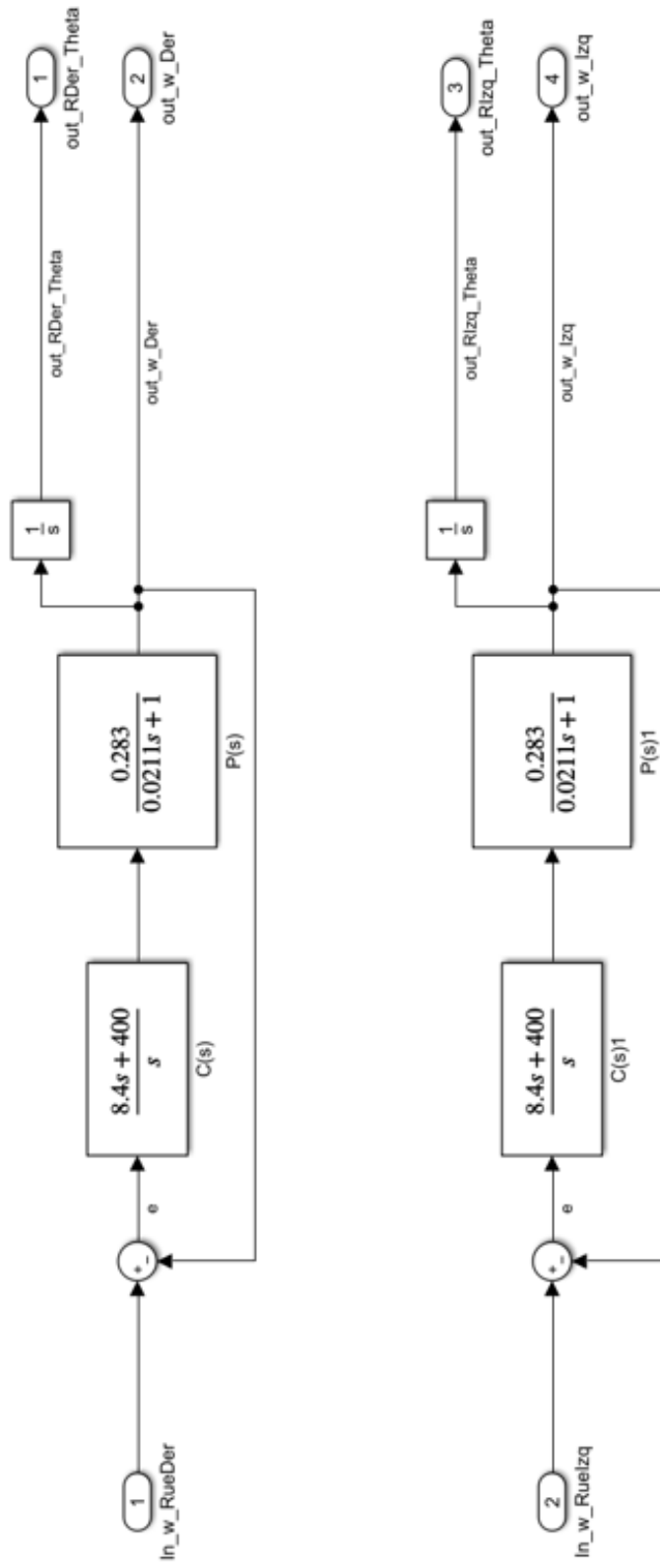


ANEXO 4

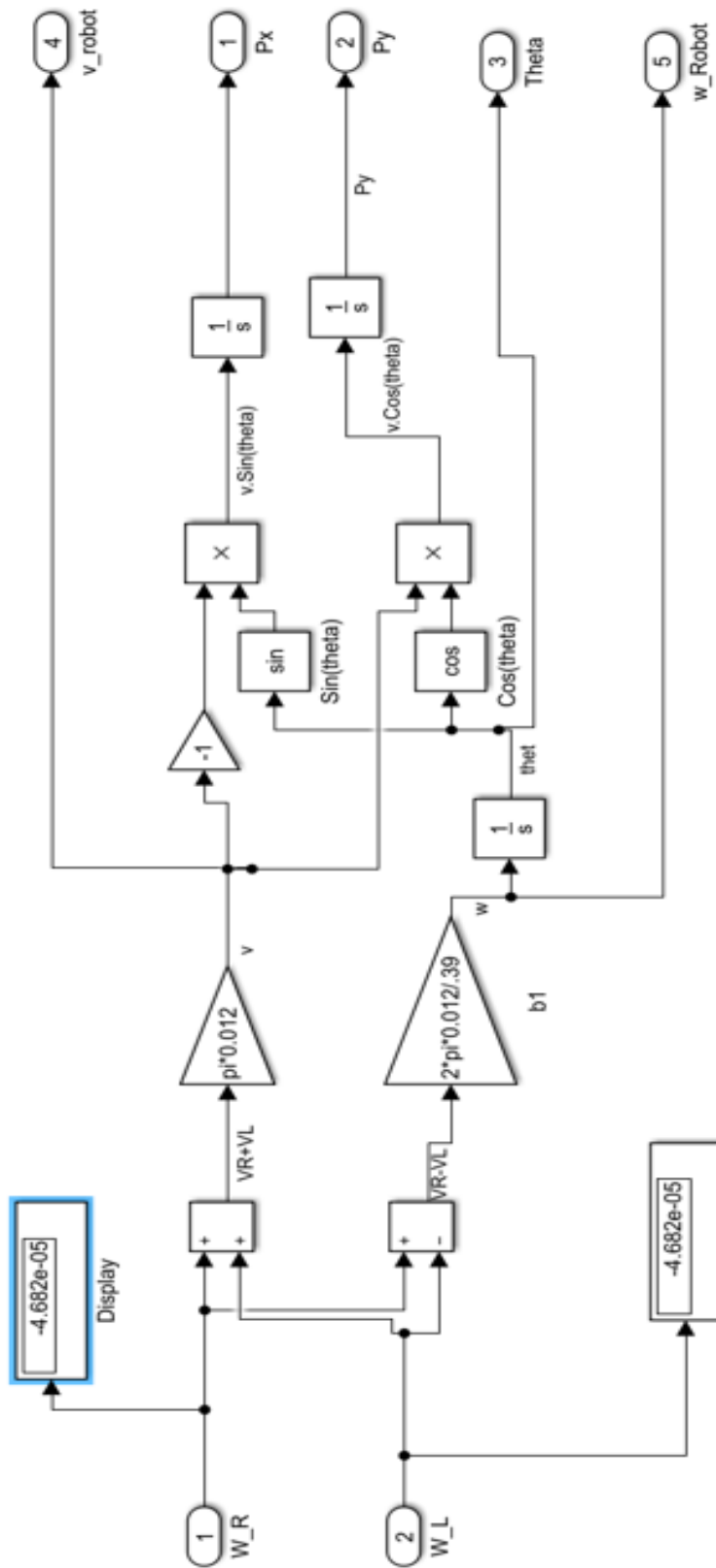
CONTROL PI, CINEMÁTICA E INTERFAZ DE CONEXIÓN CON EL MUNDO VIRTUAL



ANEXO 5 CONTROL MOTORES



ANEXO 6 CINEMÁTICA DIRECTA



ANEXO 7
MUNDO VIRTUAL



ANEXO 8

FICHA TÉCNICA DEL ACERO INOXIDABLE

TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE		SERIE 300			
		Acero al Cromo - Níquel	Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno		
DESIGNACIÓN	TIPO AISI	304	316		
	COMPOSICIÓN QUÍMICA	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 18% - 20%* Ni 8% - 10,5%*	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 16% - 18%* Ni 10% - 14%* Mo 2% - 2.5%*		
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO A 20C (DENSIDAD)	(g/cm ³)	7.9	7.95 - 7.98	
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	(N/mm ²)	193,000	193,000	
	ESTRUCTURA		AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	
	CALOR ESPECÍFICO A 20C	(J/Kg K)	500	500	
	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A 20C/100C	(W/m K)	15 / 16	15 / 16	
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN A 100C	(x 10 ⁶ C ⁻¹)	16.0 - 17.30	16.02 - 16.5	
	INTERVALO DE FUSIÓN	(C)	1398/1454	1371/1398	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD ELÉCTRICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO		AMAGNÉTICO 1.008	AMAGNÉTICO 1.008	
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C	(μΩm)	0.72 - 0.73	0.73 - 0.74	
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20C	DUREZA BRINELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		130150 / 180330	130185 / -	
	DUREZA ROCKWELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		7088 / 1035	7085 / -	
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN RECOCIDO / DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rm (N/mm ²)	520 - 720 / 540 - 750	540690 / -	
	ELASTICIDAD RECOCIDO / CON DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rp (N/mm ²)	210 / 230	205410 / -	
	ELONGACIÓN (A ₅) MIN	(%)	≥ 45		
	RESILIENCIA KCUL / KVL	(J/cm ²)	160 / 180	160 / 180	
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD	RP(0.2) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	125 / 97 / 93	140 / 125 / 105
		RP(1) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	147 / 127 / 107	166 / 147 / 127
	LÍMITE DE FLUENCIA A 500C/600C/700C/800C	σ ₁ /10 ⁵ /t (N/mm ²)	68 / 42 / 14.5 / 4.9	82 / 62 / 20 / 6.5	
TRATAMIENT. TÉRMICOS	RECOCIDO COMPLETO	(OC)	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	
	RECOCIDO INDUSTRIAL				
	TEMPLADO		NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE	
	INTERVALO DE FORJA INCIAL / FINAL	(C)	1200 / 925	1200 / 925	
OTRAS PROPIEDADES	FORMACIÓN DE CASCARILLA, SERVICIO CONTINUO / SERVICIO INTERMITENTE		925 / 840	925 / 840	
	SOLDABILIDAD		MUY BUENA	MUY BUENA	
	MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112		45%	45%	
	EMBUTICIÓN		MUY BUENA	BUENA	

* Son aceptables tolerancias de un 1%