




DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA DESINFECCIÓN DE SUPERFICIES CON LUZ ULTRAVIOLETA


DESIGN AND CONSTRUCTION OF A ROBOT FOR DISINFECTION OF SURFACES WITH UV LIGHT

Fecha de Recepción : 30/11/2021
Fecha de Aprobación : 10/12/2021
Fecha de Publicación : 06/06/2022

DOI: <https://doi.org/10.26495/icti.v9i1.2161>

 Juan Diego Villamizar García¹

 Javier Rangel Castro²

 Jorge Enrique Meneses Flóres³



Resumen

En respuesta a la emergencia sanitaria producto del COVID-19 se diseña un prototipo de robot móvil con el objetivo de automatizar los protocolos de desinfección en los salones de la universidad industrial de Santander en preparación para el eventual retorno a la presencialidad. Este prototipo hace uso de lámparas de luz ultravioleta tipo C ampliamente utilizadas para el tratamiento de agua y aire en espacios cerrados pero que debido al riesgo que representan para los seres humanos apenas comienza a implementarse en otros ambientes con ayuda de robots y sistemas de automatización. Se realizó entonces el diseño en detalle que involucra la parte mecánica, electrónica y de software basado en los requerimientos correspondientes. La fabricación del prototipo transcurre durante la emergencia sanitaria y por lo tanto se busca que en su mayoría pueda ser construido desde casa con poca ayuda de terceros y con componentes disponibles en el mercado local. Para la capa de software se hace uso de la plataforma ROS que facilita la programación de robots autónomos y se implementó una aplicación móvil para permitir el manejo remoto. Finalmente, se realizaron las pruebas de operación en los salones de la UIS y se concluyó que el sistema realizado puede cumplir su función de forma efectiva, pero hacen falta varias mejoras tanto en hardware como en software para optimizar su desempeño y confiabilidad.

Palabras Clave: Robot, desinfección de salones, COVID-19, luz ultravioleta, ROS.

Abstract

In response to the health emergency caused by COVID-19 a mobile robot prototype is designed with the aim of automating the disinfection protocols for the classrooms of the university (UIS) in preparation for the return to the face-to-face classes. This prototype uses type C ultraviolet lights widely used for water and air treatment in closed spaces, but due to the health risk it represents for the human beings it is just beginning to be implemented in different environments using robots and automation systems. Then proceed to the detailed design phase that involves the mechanical, electronic and software design based on the corresponding requirements. The manufacturing of the prototype is made during the health emergency and therefore aim to be as easy as possible to be made at home with little external help and with local components. The software layer is based in ROS, a

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, juan.villamizar9@correo.uis.edu.co.

² Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, javier.rangel3@correo.uis.edu.co

³ Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, jmeneses@uis.edu.co.

specialized platform for autonomous robots and a mobile app is developed to allow remote control of the robot. Finally, operational tests are carried out in the classrooms of UIS reaching to the conclusion that the current prototype is in fact capable of achieving the objective effectively but still many enhancements need to be made to improve the overall performance and reliability of the system.

Keywords: Robot, rooms disinfection, COVID-19, UV light, ROS.

1. Introducción

El tema de la limpieza y desinfección de superficies se ha convertido en una gran problemática durante la emergencia sanitaria debido al COVID-19 y tendrá especial importancia para la reapertura de espacios de alta afluencia de personas como lo son los salones de clase de universidades y colegios. Los protocolos de bioseguridad para dichos ambientes incluyen limpiezas frecuentes de las superficies que consumen buena cantidad de productos químicos y demandan grandes esfuerzos por parte del personal de limpieza que a su vez se convierte en un gasto económico para las instituciones.

El uso de luz ultravioleta para desinfección, más específicamente la luz UV de onda corta o UV-c ha sido estudiado por décadas y su eficacia en la inactivación de un gran número de microorganismos de diferentes especies, incluyendo el virus SARS-CoV-2, está totalmente demostrada y documentada en numerosas fuentes como lo indica la Illuminating engineering society (2020). Actualmente se pueden encontrar múltiples aplicaciones comerciales que hacen uso de esta tecnología, entre las que destacan los muy usados sistemas de esterilización de agua o de aire (ESP water products, 2021), y más recientemente equipos para desinfección de objetos o recintos cerrados.

Sin embargo, la implementación de la luz UV-c implica dar solución a las grandes problemáticas que esta acarrea. En primer lugar, garantizar que la intensidad de la radiación UV-c que reciben las superficies a desinfectar sea la adecuada para la correcta inactivación del virus SARS-CoV-2 con base a las recientes investigaciones biológicas y a múltiples consideraciones técnicas como explican en su artículo Milad Raeiszadeh & Babak Adeli (2020). En segundo lugar, evitar la exposición de seres humanos y animales a la luz UV-c dado el alto riesgo biológico que esta representa, es causante de serias problemáticas a corto y largo plazo en la piel y los ojos. Y, por lo tanto, es obligatorio implementar dichas aplicaciones de forma autónoma y aislada (Salvatore Zaffina et al., 2012).

Debido a lo anterior, surge la necesidad de buscar soluciones tecnológicas para el uso seguro y efectivo de la luz UV-c como método de desinfección de espacios con alto riesgo de contagio en la actual pandemia por Covid-19. La robótica, por su parte, es un área en constante crecimiento que se usa cotidianamente para automatizar procesos de limpieza similares como lo hacen las populares barredoras caseras y su implementación es cada día más sencilla y económica gracias a los nuevos desarrollos en sensores, controladores y software.

De esta manera se estructura este proyecto con el objetivo de construir y poner a prueba un prototipo funcional de robot autónomo móvil que haga uso de la luz UV-c para desinfectar las mesas, sillas y otras superficies en un salón de clases de la Universidad Industrial de Santander en un tiempo inferior a 15 minutos. Su desarrollo transcurre durante las cuarentenas producto de la misma pandemia y por lo tanto se realiza un diseño enfocado en la facilidad de construcción haciendo uso de componentes comerciales de fácil adquisición en el mercado local y de tal forma que pueda llevarse a cabo en su mayoría desde casa con las herramientas disponibles y con la mínima ayuda de terceros.

Para la capa de software se hace uso de la plataforma ROS (Robot Operating System) que cuenta con un gran número de librerías y algoritmos muy desarrollados que se encargan de controlar las tareas más generales de las que depende un robot autónomo, tales como: la lectura e interpretación de sensores, la localización, el mapeo, el control de actuadores, entre otros. De esta forma, la tarea en programación se

reduce a implementar y calibrar los algoritmos disponibles y crear e integrar aquellos que son específicos para la aplicación deseada.

Finalmente se busca evaluar el desempeño de este primer prototipo de bajo costo para cumplir con la tarea propuesta, plantear una serie de mejoras posibles y determinar el potencial de la robótica móvil para automatizar eficientemente tareas cotidianas teniendo en cuenta la comodidad del usuario, la confiabilidad y el costo.

2. Material y métodos

En este proyecto se realizó el diseño y construcción completa de un prototipo de robot móvil autónomo y como tal, en su desarrollo están involucrados tres grandes sistemas que corresponden a las principales áreas de la ingeniería en las que se fundamenta la robótica (mecánica, electrónica y programación):

- Sistema mecánico estructural
- Sistema de hardware y electrónica
- Sistema de autonomía y software

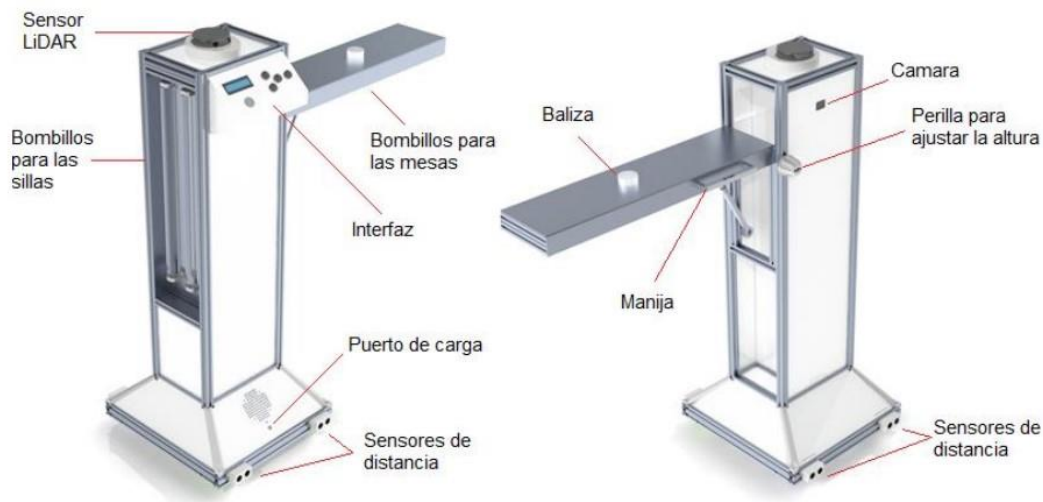
A continuación, se presenta la descripción general de estos sistemas individualmente:

2.1 Sistema mecánico estructural

Este sistema se refiere a toda la parte externa del prototipo, las estructuras que soportan los sensores y actuadores, los mecanismos necesarios para el desplazamiento y operación y la parte estética. En la figura 1 se muestra un renderizado del robot en vistas isométricas donde se señalan los principales componentes de este sistema.

Figura 1

Vista de los componentes externos del sistema mecánico del prototipo

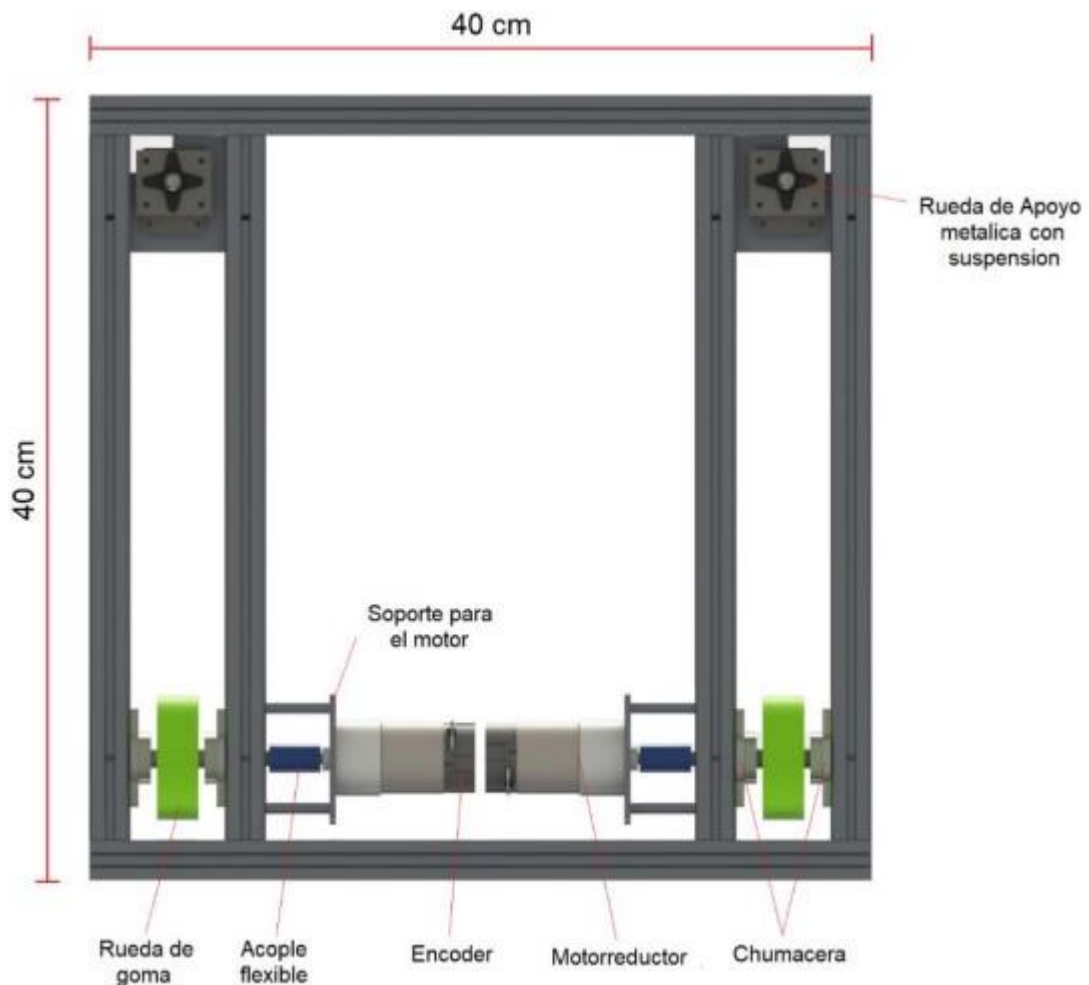


La estructura principal está fabricada con perfil de aluminio modular para facilitar su construcción y paneles de acrílico blanco entre ellos. Las cubiertas de los bombillos son de lámina de aluminio de dos milímetros doblada y se cuentan con varias piezas funcionales en plástico PLA blanco impreso en 3D.

La base, encargada de permitir el movimiento del robot cuenta con dos motorreductores de 12 voltios a 100 rpm acoplados con ruedas de silicona de seis centímetros de diámetro en la parte trasera del robot. En la parte delantera se ubican dos ruedas esféricas de apoyo metálicas con un sistema de suspensión para mejorar la tracción del robot y su desempeño en suelo con pequeñas irregularidades. Esta distribución se observa en la figura 2.

Figura 2

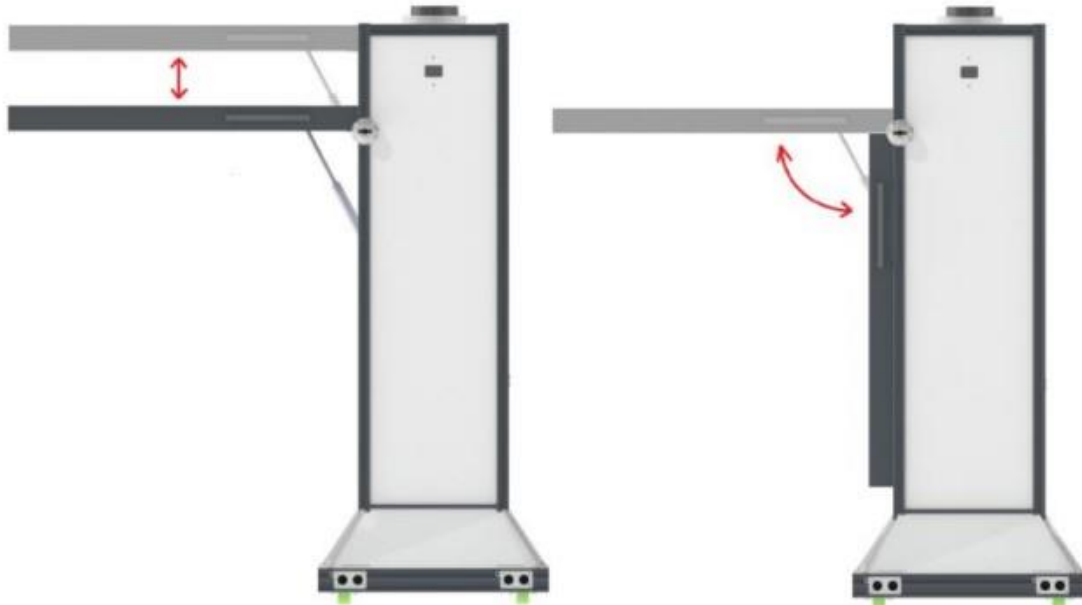
Vista detallada de la base



Para la desinfección el prototipo cuenta con 4 bombillos de luz UV-c de 15 watts ubicados, dos verticalmente para la desinfección de las sillas y otros elementos del salón, y dos en un brazo móvil ajustable encargados de desinfectar con gran intensidad la superficie de las mesas.

Figura 3

Ajuste vertical y posición de guardado del brazo de los bombillos



El brazo de los bombillos para las mesas puede guardarse y desplegarse para su uso y su altura es ajustable para adaptarse mejor a las diferentes mesas como se muestra en la figura 3. A la derecha se observa el despliegue que le permite al brazo acomodarse a 90 o 0 grados con respecto al robot para la operación y el guardado respectivamente. Este movimiento se realiza con la ayuda de un pistón de aire pasivo o amortiguador de gas que le permite mantener estas dos posiciones de forma segura y con un desplazamiento lento.

A la izquierda de la figura se muestra el movimiento de ajuste de altura, para ello se debe soltar un poco la perilla, deslizar el brazo hacia arriba o abajo con ayuda de la manija y volver a apretar la perilla a la altura deseada. La altura mínima que puede tener el brazo es de 80cm con respecto al suelo y la máxima es de 93cm. De esta forma se busca que dicha lámpara pueda adaptarse más fácilmente a las diferentes alturas posibles para las mesas y mantenerse lo más cerca posible a la superficie para mejorar la desinfección.

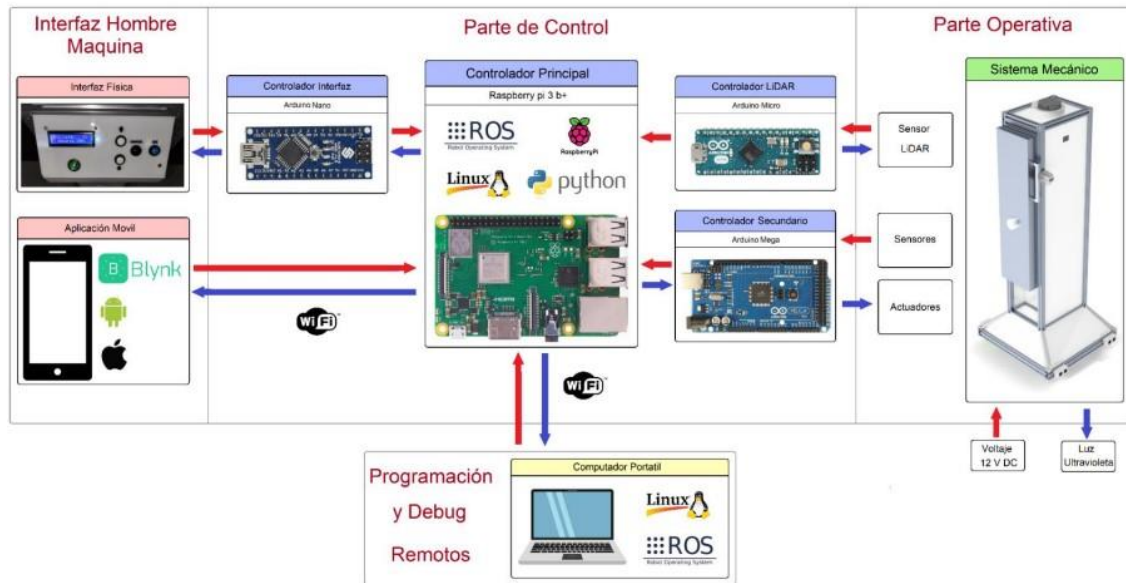
Finalmente se encuentran en este sistema otros accesorios, en la parte superior se ubica el sensor LiDAR, la cámara y la interfaz física con el botón de encendido del robot, la pantalla y los botones. Y en la parte inferior destacan los sensores ultrasónicos y el puerto de carga.

2.2 Sistema de hardware y electrónica

En este sistema se encuentran todos los componentes de hardware encargados del control y la automatización del robot destacando los sensores y controladores. También incluye los subsistemas de alimentación y distribución de potencia. En la figura 4 se describe de manera general la estructura del sistema de hardware basada en el modelo estructural de un sistema automatizado de Josep Balcells en su libro *Autómatas Programables* (1998).

Figura 4

Estructura de hardware del sistema automatizado



Para comenzar, la entrada del sistema corresponde a la potencia suministrada por una batería de ion de litio de 12 voltios ensamblada por los autores con una capacidad nominal de 5000 miliamperios hora. Este subsistema incluye un circuito de protección que se encarga de regular la carga y descarga de la batería para alargar la vida útil de la misma y garantizar la seguridad tanto del robot como de los operarios. Para su carga se dispone de un puerto de entrada ubicado en la parte inferior del robot al cual se conecta una fuente de 19 voltios, típica para computadores portátiles, y se incluye un led que se enciende para indicar cuando se completa la carga.

El sistema después se divide en la parte operativa, de control y de interfaz, y se tienen una comunicación externa con para programación y debug remotos.

La parte operativa corresponde principalmente al sistema mecánico explicado en el numeral anterior en el que se encuentran los sensores y actuadores del robot. Los actuadores son principalmente los bombillos de luz ultravioleta y los motores que permiten el desplazamiento del robot y los sensores, encargados de la navegación, son los expuestos a continuación:

- LiDAR Neato XV: Ubicado en la parte superior del robot, por medio de un láser giratorio realiza un escaneo de 360 grados que permite al robot ubicarse y desplazarse dentro del salón
- Sensor inercial IMU 6050: compuesto por un giroscopio y un acelerómetro, es usado principalmente para estimar la rotación del robot esencial para la navegación.
- Encoders de efecto hall: están incorporados en los motores y permiten medir la rotación de los mismos y de esta forma controlar su velocidad y estimar el desplazamiento del robot.
- Sensores de distancia ultrasónicos: por medio de sonido de alta frecuencia miden la distancia hasta los objetos que tienen enfrente. Se ubican en la parte inferior y se usan para la detección de obstáculos.

En la parte de control destaca el controlador principal del robot que es una Raspberry pi 3 encargada de los procesos pesados de computación utilizando la plataforma de robótica libre ROS en sistema operativo Linux. Además, se cuenta también con tres controladores basados en Arduino que se encargan

principalmente de interactuar con los sensores y actuadores mientras transmiten la información hacia la Raspberry a través de los puertos seriales USB. Estos controladores son:

- Un Arduino micro que actúa simplemente como puente entre el sensor LiDAR y la Raspberry y a su vez controla con PID la velocidad de rotación del sensor.
- Un Arduino nano que controla la interfaz (la pantalla LCD y los botones), la baliza y el Buzzer que informan los estados del robot al operario, un sensor de límite para indicar cuando los bombillos no se encuentran en la posición de operación y el un medidor del voltaje de la batería.
- Un Arduino mega como controlador secundario encargado de los demás sensores y actuadores: el control PWM de los motores, la lectura de sus respectivos Encoders, el sensor IMU, los sensores de distancia ultrasónicos usados para la detección de obstáculos y el transistor MOSFET para el encendido y apagado de los bombillos ultravioleta. Fue necesario un Arduino mega, debido principalmente a la cantidad de entradas y salidas digitales requeridas.

Para la parte de interacción con el operario se dispone de una interfaz física montada en la parte superior del robot que cuenta con el botón de encendido principal, una pantalla LCD de 16 caracteres, botones para la interacción y una baliza luminosa con buzzer para dar las alertas sobre el estado del robot. Además, se cuenta con una aplicación de celular con la plataforma Blynk que le otorga al usuario un control a distancia del robot a través de WIFI, e incluye también la visualización de video en vivo gracias a la cámara montada en la parte frontal del robot.

Por último, Para la etapa de programación y debug se establece una comunicación a través de WIFI con un computador portátil con Linux y ROS desde la cual se puede editar en tiempo real la programación robot y acceder a todas las herramientas de visualización y debug que ofrece esta plataforma

2.3 Sistema de autonomía y software

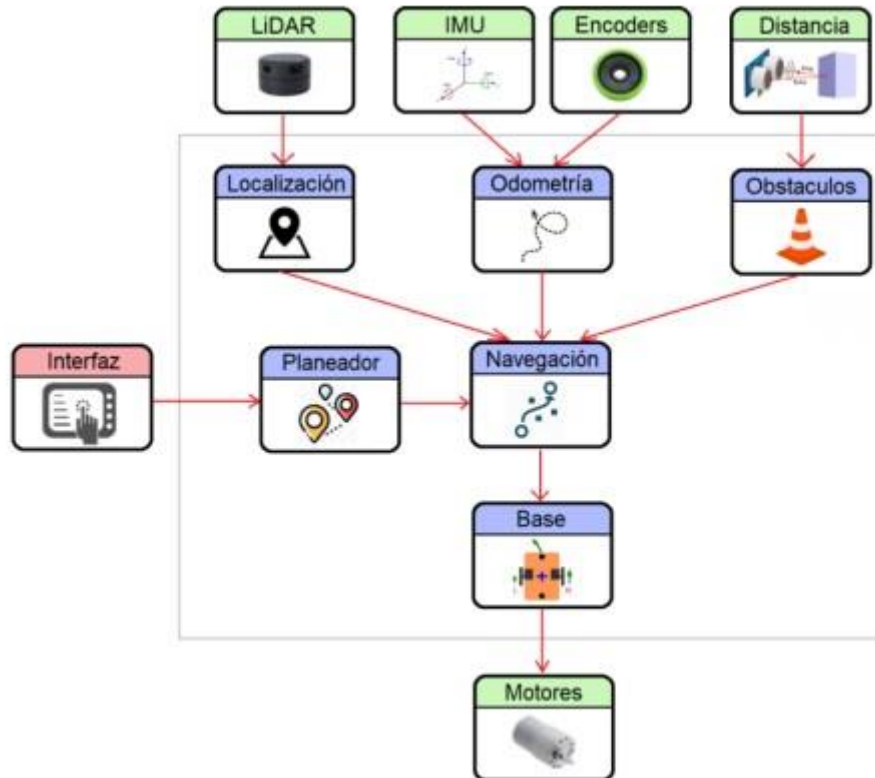
Este sistema es el encargado de todo el comportamiento del robot donde destaca especialmente la autonomía para navegar la ruta requerida basándose en los sensores disponibles.

Los procesos fundamentales se llevan a cabo en la Raspberry pi haciendo uso de la plataforma ROS que provee librerías altamente optimizadas y herramientas de mucha utilidad para la programación de robots. De esta manera el software principal del robot se compone en su mayoría por código realizado por los autores en lenguaje Python integrado en el ambiente de desarrollo de ROS e incluye múltiples algoritmos preprogramados provenientes de las librerías que se encargan de los procesos de mayor complejidad para realizar la difícil tarea de la navegación autónoma. (Koubaa Anis, 2016).

En la figura 5 se observa un esquema que representa de forma resumida los principales procesos que ejecuta continuamente el robot durante la operación para navegar efectivamente a través del salón. En verde se ilustran los sensores y actuadores que son controlados con sus respectivas capas de software, en rojo la entrada proveniente de la interfaz ya sea física o a través de la aplicación móvil y en azul los algoritmos internos de procesamiento que se resumen a continuación.

Figura 5

Diagrama general del software



- Localización: toma los datos dados por el sensor LiDAR y los compara con un mapa del salón previamente cargado para estimar la posición del robot en el salón.
- Odometría: este proceso utiliza los sensores internos, los Encoders y el IMU, para calcular la trayectoria recorrida por el robot y obtener una posición con respecto al punto de inicio.
- Detección de obstáculos: con ayuda de los sensores de distancia ultrasónicos ubicados en la base se verifica que la ruta del robot no se encuentre bloqueada por ningún obstáculo.
- Planeador: este proceso es el encargado de proveer la ruta que debe seguir el robot dependiendo del salón en que se encuentre y dar dirección al proceso de navegación, también recibe las órdenes dadas por la interfaz de inicio, pausa o cancelación.
- Navegación: uno de los procesos fundamentales del comportamiento del robot, se encarga de tomar la posición dada por los procesos de localización y odometría y la ruta dada por el planeador para computar el movimiento que debe realizar el robot para llegar al punto deseado, teniendo en cuenta también la presencia de obstáculos en la ruta.
- Base: este proceso toma las instrucciones de movimiento dadas por el proceso de navegación y los convierte en comandos para controlar directamente los motores de la base. Además, implementa varios sistemas de control que aseguran que el robot realiza su movimiento de manera adecuada tanto en dirección como en velocidad.

Además de los procesos explicados anteriormente encargados principalmente de la navegación, la programación del robot incluye varios procesos adicionales más específicos para la aplicación propuesta en este proyecto, entre estos destacan:

- Detección de personas: como se ha establecido anteriormente, el robot debe realizar su operación con el salón vacío debido al riesgo que representa la radiación UV-c para los seres humanos. Por esta razón se decide añadir un proceso adicional para la seguridad de los operarios para prevenir que el robot inicie su recorrido si se detecta una posible persona dentro del salón. Para ello se hace uso del algoritmo detector de obstáculos desarrollado por Mateusz Przybyla (2017) que es capaz de filtrar y agrupar los puntos dados por la lectura del sensor LiDAR para obtener de ellos un estimado del tamaño y la forma de los objetos cercanos, así como su distancia al robot, y de esta forma identificar un objeto como una posible persona.
- Aplicación móvil: Como parte de la interfaz hombre máquina, se cuenta con una aplicación para celular que se comunica a través de WI-FI con el robot y le permite al operario tener control sobre este de forma remota. Para ello se hace uso de la plataforma Blynk enfocada en lo que se conoce como internet de las cosas (IoT) y es gratuita para aplicaciones no comerciales (Blynk, 2021). La app se construye desde el celular de forma gráfica simplemente arrastrando los widgets como interruptores, espacios de texto, deslizadores, etc. Y en la Raspberry se programa para que cada widget cumpla con su función deseada. Desde la app se pueden realizar las mismas funciones que desde la interfaz física, pero se tiene además información del estado del robot en todo momento y la posibilidad de pausar, reanudar o cancelar el recorrido a distancia. Adicionalmente, con ayuda del widget de video el operario puede visualizar el comportamiento del robot a través de la cámara. En la figura 6 se muestra el panel de control principal como se observa desde el celular con las respectivas herramientas señaladas.

Figura 6

Captura de pantalla de la aplicación móvil



3. Resultados

Se logra concluir exitosamente con el desarrollo del prototipo completo y se procede a una etapa de pruebas de validación. En la figura 7 se muestran fotos del robot construido en posición de guardado mientras que en la figura 8 se observa durante la operación durante una de las pruebas con los bombillos encendidos.

Figura 7

Fotos del robot finalizado en posición de guardado



Figura 8

Foto del robot con los bombillos encendidos



La etapa de pruebas se divide en dos secciones:

La primera transcurre una vez terminada la etapa de programación y ajuste de parámetros y se realiza al interior de una habitación en el apartamento donde fue construido el robot. Tiene como objetivo simular un recorrido en un escenario similar al de operación normal del robot, verificar el correcto funcionamiento de los tres sistemas actuando en conjunto, buscar posibles mejoras y comprobar la confiabilidad del robot para repetir efectivamente la tarea propuesta. Para ello se construye una ruta de prueba como se muestra en la figura 9 y se obtienen los siguientes resultados y conclusiones.

Figura 9

Habitación y ruta para la primera etapa de pruebas



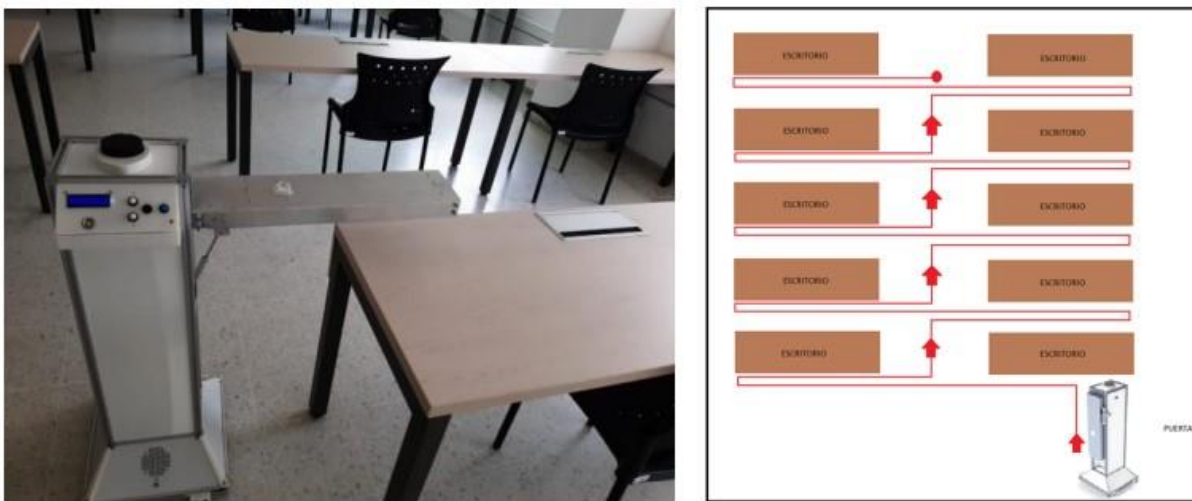
- El robot ejecuta adecuadamente la ruta en los más de 20 recorridos realizados con una precisión adecuada.
- No se encuentran problemas en la navegación ni en el movimiento general del robot, pero existe un nivel de vibración y ruido mayor al deseado producto del movimiento de la base que no llega a afectar su desempeño.
- El sensor LiDAR presenta un error recurrente que disminuye su frecuencia efectiva de lectura, lo cual puede producir algunas demoras en el inicio del movimiento y la ubicación, pero no llega a afectar el desempeño de la navegación.
- Los sensores de detección de obstáculos presentan también una baja probabilidad de lecturas erróneas, falsos positivos y falsos negativos, pese a los filtros de software implementados y calibrados. Esto genera que el robot se detenga, aunque no exista ningún obstáculo que lo bloquee o que demore en detenerse y llegue a chocarse. Sin embargo, al reanudar el movimiento tras la pausa en ambos casos, el robot continúa su movimiento adecuadamente por lo que no se ve afectada la navegación, pero si una parte importante de la funcionalidad y la autonomía del robot.
- Durante esta etapa se mide también la capacidad real de la batería y se determina que es suficiente para la alimentación del robot por al menos 25 minutos en condiciones de trabajo. También se determina el tiempo del periodo de carga, aproximadamente 90 minutos.

Con esta etapa de pruebas se concluye que el robot es capaz de cumplir adecuadamente con la tarea propuesta con buena confiabilidad y precisión salvo por menores defectos que no afectan considerablemente su desempeño. Con esto se procede a la segunda etapa de pruebas.

La segunda etapa se lleva a cabo directamente en los salones de clase de la universidad industrial de Santander una vez validado su funcionamiento en la etapa anterior. Para ello, se solicita un permiso para realizar las pruebas una vez se relajan las restricciones producto de la pandemia. El objetivo de estas era someter el robot a todas las condiciones de trabajo reales que hasta el momento no habían podido ser verificadas por no tener acceso a la universidad. En esta etapa se realizan todas las configuraciones necesarias para el trabajo del robot en este nuevo ambiente y se programa la ruta de limpieza como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Robot dentro del salón de clases y detalle de la ruta propuesta



En esta etapa se obtienen las siguientes conclusiones:

- A pesar de que el material del suelo del salón es similar al de la habitación de la primera etapa de pruebas, el del salón se encuentra mucho más liso y con una considerable acumulación de polvo, además se observan desniveles y grietas en el mismo. Todos estos factores se convirtieron en una gran problemática para el movimiento del robot ya que las ruedas se deslizaban o quedaban trabadas durante el recorrido y, aunque lograra superar estos obstáculos se producían errores en las lecturas de los sensores catastróficas para la navegación.
- Por otro lado, los demás aspectos mecánicos del robot resultaron ser acertados, la altura y distribución de las lámparas, el ancho y alto del robot y la planeación de la trayectoria dentro del salón fueron adecuados para realizar la función deseada.

Con estas observaciones se dio por concluida la jornada de pruebas de forma poco satisfactoria debido a los problemas en el movimiento del robot. De esta manera, se decide realizar modificaciones en la base para mejorar su desempeño y programar una segunda visita para continuar con las pruebas.

Las mejoras realizadas se enfocaron en mejorar la movilidad del robot en terreno liso sin modificar seriamente la estructura del mismo. Se mejoró la adherencia de las ruedas al suelo, se añadió el sistema de suspensión para prevenir quedar estancado en las grietas y desniveles y se mejoraron los sistemas de control de los motores de la base para corregir más efectivamente las irregularidades en el movimiento.

Una vez finalizadas estas mejoras, se procede con la segunda jornada de pruebas en el salón de clases manteniendo los mismos objetivos de la vez anterior y a su vez probar el desempeño de la base con estas nuevas mejoras. En esta ocasión se logra culminar exitosamente las pruebas y se obtienen los siguientes resultados y observaciones:

- Se logró culminar con éxito 5 veces la ruta programada para el salón con una duración promedio de 8 minutos y 30 segundos desde que se da la orden de inicio.
- Las mejoras implementadas mejoraron notablemente el desempeño del robot, pero siguieron existiendo pequeños deslizamientos que afectaron su precisión y en algunas pocas ocasiones dañaron por completo el recorrido y por lo tanto la confiabilidad del robot disminuyó.
- Otra fuente de error producto de las desviaciones mencionadas anteriormente es que el robot no cuenta con sensores de distancia a la altura de las mesas y en algunas ocasiones son estas las que llegan a afectar su recorrido sin que se activen a tiempo los sistemas de detección de obstáculos. Se plantea entonces la necesidad de incluir estos sensores y software para que el robot responda adecuadamente a la posición de las mismas sin depender solo de la localización.
- Realizar los procesos de mapeo y configuración necesarios para el funcionamiento del robot en este nuevo ambiente resulto largo y tedioso debido principalmente a la extensión del salón. Se debe plantear una manera más eficiente y automatizada para este proceso.

Finalmente, se deben resaltar los costos empleados en la realización de este primer prototipo que tiene como objetivo verificar la viabilidad de un robot autónomo de bajo costo. En la tabla 1 se presentan resumidos los precios de los componentes de los principales sistemas del robot que en total suman aproximadamente 800 dólares americanos.

Tabla 1

Costos totales

Concepto	Precio (USD)
Estructura y componentes mecánicos	\$ 320,00
Electrónico general	\$ 60,00
Batería	\$ 47,00
Controladores	\$ 82,00
Sensores y actuadores	\$ 251,00
Gastos de envío	\$ 26,00
Total	\$ 786,00

4. Discusión

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que se logra desarrollar un prototipo de robot capaz de cumplir el complejo objetivo propuesto usando componentes comerciales de bajo costo, sin la necesidad de equipos sofisticados haciendo uso de plataformas libres como ROS y Blynk para simplificar los trabajos de programación. De esta manera se demuestra que la robótica autónoma móvil a pequeña escala es cada vez más asequible con bajo presupuesto y desarrollo.

Sin embargo, el alcance y la duración de este proyecto no fue el suficiente para perfeccionar el prototipo aquí realizado y las pruebas concluyen con una serie de mejoras a tener en cuenta para continuar con su desarrollo.

Una de las principales debilidades encontradas en este prototipo fue la base. Las ruedas motrices, las ruedas de apoyo y la estructura de la misma no se desempeñaron adecuadamente en el suelo liso y con

suciedad de los salones de prueba afectando considerablemente la confiabilidad del robot. Para futuros prototipos es recomendable un rediseño general de esta sección del robot se plantean las siguientes mejoras:

- Hacer uso de ruedas de mayor diámetro y espesor para mejorar la adherencia al suelo.
- Ubicar las ruedas motrices más cercanas al centro de gravedad del robot.
- Disminuir el peso total del robot.
- Implementar una base con cuadro ruedas motrices.

Otra debilidad encontrada está relacionada con la detección de obstáculos. Debido a la gran altura del robot y a las condiciones del salón (distribución y características de las mesas y sillas) es necesario incluir más y mejores sensores que le permitan al robot tener un mejor control de sus alrededores. También se plantea el uso de una cámara y sistemas de procesamiento de imágenes sencillos para tener un sistema mucho más robusto en la detección de obstáculos en tres dimensiones.

Por último, para poner en práctica la aplicación planteada es necesario cubrir la demanda de limpieza de un gran número de salones y por lo tanto la autonomía energética conseguida para el robot no es óptima. Se hace necesario aumentar la capacidad de la batería y diseñar un sistema con batería removible de tal forma que se disponga de varias baterías previamente cargadas para reemplazarlas y cubrir más salones consecutivamente.

5. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un robot autónomo de desinfección de superficies bajo las restricciones de espacio de los salones del edificio de laboratorios de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el cual logra desinfectar un aula de 10 mesones en un tiempo aproximado de 8 minutos y medio. Gracias a su batería con autonomía de 25 minutos puede desinfectar cómodamente dos salones por carga.
- Se logra realizar un robot capaz de navegar de forma autónoma y robusta por el salón guiándose por sus alrededores mientras sigue la ruta preprogramada. Con la ayuda de ROS se simplifica enormemente el trabajo de software necesario para un desarrollo de este tipo y, por lo tanto, se abren las puertas para el uso de robots autónomos en todo tipo aplicaciones similares.
- El prototipo alcanzo el objetivo propuesto al realizar efectivamente la ruta de desinfección programada, pero requiere de varias mejoras tanto en software como en hardware para llegar al nivel de precisión y confiabilidad necesarias para popularizar comercialmente su uso. A partir de este proyecto se espera generar un impulso al desarrollo de proyectos tecnológicos enfocados en combatir los grandes desafíos que enfrenta la humanidad actualmente con el COVID-19.

6. Referencias

- Balcells, J. (1998). *Autómatas Programables*. Alfaomega. (Pág. 140)
- BLYNK. (2021). Blynk documentation. <http://docs.blynk.cc/>
- ESP WATER PRODUCTS. Understanding Water UV Purification. 2021. Disponible en: <https://www.espwaterproducts.com/understanding-uv/>
- IES Photobiology Committee. (2020). IES Committee Report: Germicidal Ultraviolet (GUV) – Frequently Asked Questions. <https://media.ies.org/docs/standards/IES-CR-2-20-V1-6d.pdf>
- Koubaa Anis. (2016). Robot Operating System (ROS). ROS Basics and Foundations. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9>
- Przybyla, M. (2017). Online Detection and Tracking of 2D Geometric Obstacles from LRF Data. https://github.com/tysik/obstacle_detector/blob/master/resources/ObstacleDetector.pdf

- RAEISZADEH, Milad. y ADELI, Babak. A Critical Review on Ultraviolet Disinfection Systems against COVID-19 Outbreak: Applicability, Validation, and Safety Considerations. 2020. En revista: *ACSPhotonics*, acsphotronics.0c01245.
<https://doi.org/10.1021/acsphotronics.0c01245>
- Zaffina, S., Camisa, V., Lembo, M., Vinci, M. R., Tucci, M. G., Borra, M., Napolitano, A., & Cannatà, V. (2012). Accidental exposure to UV radiation produced by germicidal lamp: case report and riskassessment. *Photochemistry and photobiology*, 88(4), 1001–1004.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2012.01151.x>