



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN ROBOT TELEOPERADO DEDICADO A
LA MONITORIZACIÓN DE LAS FINCAS DE CAFÉ**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:

INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTADO POR:

HECTOR FERNANDO JIMENEZ OLIVA

ASESOR: JOSÉ LUIS ORDOÑEZ ÁVILA

CAMPUS: SAN PEDRO SULA

MAYO, 2020

DERECHOS DE AUTOR

©Copyright 2020

HECTOR FERNANDO JIMENEZ OLIVA

Todos los derechos son reservados

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Dedico primeramente este proyecto a Dios por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi vida. El que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado; por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres, Marvin Pineda y María Oliva, quienes han sido el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo sin importar las circunstancias. Gracias por brindarme una oportunidad para mi futuro.

Al Ing. José Ordoñez, por impulsarme a dar lo mejor para ser buen profesional.

A la Ing. Karen Peña por su cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento y siempre escucharme en los buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios, quien me ha guiado a lo largo de mi vida, llenando de bendición la misma y poniendo en mi camino a las personas correctas, dándome fortaleza por medio de ellas para sobrellevar todas las pruebas y dificultades presentadas en el camino.

Gracias a mis padres, por el amor incondicional recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban por mi avance y desarrollo de la presente tesis de investigación, es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo. Gracias por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar cada día y creer en mi potencial, por educarme con el objetivo de hacer mío, actitudes para enfrentar la vida como el amor, el trabajo, el buen humor, la alegría, la disciplina, la tolerancia, el respeto, la constancia, la generosidad, la paciencia, el apoyo, la responsabilidad, el agradecimiento, la reciprocidad y la sencillez que los caracteriza. Gracias a mi madre por estar dispuesta a apoyarme en cada paso de mi vida, sus palabras de aliento en los peores momentos fueron para mi como agua en el desierto; gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron con rectitud para ser un hombre de bien durante mi vida. Por esto y por haber logrado darme todas las herramientas para que haya sido una persona muy feliz en cada una de las etapas que he vivido, estaré agradecido toda la vida.

Quiero expresar mi gratitud hacia la ingeniera Karen Peña, quien me ha brindado todo su amor y apoyo incondicional, motivándome a creer en mi en los momentos más difíciles, gracias por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio y soportar todos mis momentos de estrés. Agradezco a los docentes de UNITEC que me compartieron sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión, haciendo una mención especial al ingeniero José Luis Ordoñez, quien me demostró que siempre se es capaz de más, motivándome cada día a exprimir mi potencial a un nivel más alto. Gracias a mis amigos, Israel Sarmiento, Leonel Aguilar, Omar Alvarado, Christian Méndez, Juan Rivera, Ian Canales, Jonathan Rodríguez, Luis Palma, Mauricio García y Abner Rodríguez, por haber hecho de espacios vacíos las mejores experiencias, anécdotas, aprendizajes y grandes afectos que recordaré por siempre.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo.

RESUMEN EJECUTIVO

El rubro del café constituye el 8.5% del producto interno bruto del país, generando 1.5 millones de empleos directos, generando así la dependencia del 20% de la población hondureña. Por lo tanto, al existir una pérdida en la producción del café, se ve afectada de manera negativa la economía del país. El principal responsable en la disminución de la producción del café es la enfermedad de la Roya, esta es producida por el hongo *Hemileia vastatrix*. Esta afecta la hoja causando su caída y consigo el debilitamiento de la planta llevándola en un caso severo a morir por una defoliación extrema. En años anteriores dicha enfermedad ha causado pérdidas millonarias. Por lo tanto, la detección temprana de esta enfermedad es vital para realizar el tratamiento adecuado y temprano de esta enfermedad. Se han desarrollado múltiples aplicaciones para la detección temprana de las enfermedades que afectan al cafeto, como ser, drones o robots dedicados meramente a la monitorización de las fincas de café, en el caso del uso de robots terrestres, es necesario un método de control a distancia y un sistema que sea capaz de superar los terrenos accidentados e inclinados que componen una finca de café. Por otra parte, se debe implementar el control de un brazo robótico que contenga una herramienta para recopilar información. Atendiendo a lo anterior expuesto se presenta el desarrollo de un sistema electrónico para el control de los mecanismos de un robot todo terreno dedicado a la monitorización de las fincas de café mediante la comunicación por RF. Dicho sistema, integra un PID que permite el control autónomo de la velocidad a la que se desplaza el robot, siendo de vital importancia en la consistencia de su velocidad en terrenos inclinados. Por otra parte, se implementó un selector de control rueda por rueda, en el cual es posible manipular las ruedas de manera individual. Cabe destacar que, en dicho proyecto se implementó la metodología en Espiral, con un enfoque cuantitativo de diseño experimental, con la finalidad de realizar un prototipo funcional que integre todas las partes antes mencionadas. Para lograr lo anterior expuesto se hizo uso del microcontrolador PIC18F45K22 como el cerebro de nuestro sistema.

Palabras clave: radiofrecuencia, teleoperación, microcontrolador, PWM, robot.

ABSTRACT

The coffee sector constitutes 8.5% of the country's gross domestic product, generating 1.5 million direct jobs, thus generating the dependence of 20% of the Honduran population. Therefore, as there is a loss in coffee production, the country's economy is adversely affected. The main responsible in the decline of coffee production is the disease of the Roya, which is produced by the fungus *Hemileia vastatrix*. It affects the leaf causing its fall and with it the weakening of the plant leading it in a severe case to die from extreme defoliation. In previous years, the disease has caused millionaire losses. Therefore, early detection of this disease is vital for proper and early treatment of this disease. Multiple applications have been developed for the early detection of diseases affecting coffee, such as drones or robots dedicated merely to the monitoring of coffee farms, in the case of the use of terrestrial robots, a method of remote control and a system that is able to overcome the rugged and sloping terrain that make up a coffee farm. On the other hand, control of a robotic arm containing a tool to collect information must be implemented. In the light of the above, the development of an electronic system for the control of the mechanisms of an off-road robot dedicated to the monitoring of coffee farms through RF communication is presented. This system integrates a PID that allows autonomous control of the speed at which the robot moves, being of vital importance in the consistency of its speed on sloping terrain. On the other hand, a wheel-by-wheel control selector was implemented, in which it is possible to manipulate the wheels individually. It should be noted that, in this project, the methodology was implemented in Spiral, with a quantitative approach of experimental design, in order to make a functional prototype that integrates all the parts. To achieve the above, the PIC18F45K22 microcontroller was used as the brain of our system.

Keywords: radio frequency, teleoperation, microcontroller, PWM, robot.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
II.	Planteamiento del Problema.....	2
2.1.	Precedentes del Problema.....	2
2.2.	Definición del Problema.....	3
2.3.	Justificación.....	4
2.4.	Preguntas de Investigación.....	4
2.5.	Objetivos.....	5
2.5.1.	Objetivo General.....	5
2.5.2.	Objetivos Específicos.....	5
III.	Marco Teórico.....	6
3.1.	Análisis de la situación.....	6
3.1.1.	Análisis del macroentorno.....	6
3.1.2.	Análisis Interno.....	8
3.2.	Teorías de sustento.....	9
3.2.1.	Grandes mentes en la invención de la Radiocomunicación.....	10
3.2.2.	Teleoperación.....	12
3.2.3.	Dispositivos de control.....	15
3.2.4.	Dispositivos de realimentación.....	16
3.2.5.	Radiocomunicación.....	17
3.2.6.	Canales de radio.....	18
3.2.7.	Antenas.....	19

3.2.8.	Ruidos	20
3.2.9.	Características del transmisor	20
3.2.10.	Radio Frecuencia.....	21
3.2.11.	Métodos de control.....	24
3.2.12.	Microcontroladores PIC.....	26
3.2.13.	Modelo en Espiral.....	30
IV.	Metodología	35
4.1.	Enfoque.....	35
4.2.	Variables de Investigación.....	35
4.3.	Técnicas e instrumentos aplicados.....	37
4.4.	Materiales	38
4.5.	Metodología de Estudio.....	38
4.5.1.	Ciclo 1 método espiral.....	38
4.5.2.	Ciclo 2 método espiral.....	40
4.5.3.	Ciclo 3 método espiral.....	41
4.5.4.	Ciclo 4 método espiral.....	42
4.6.	Metodología de Validación.....	43
4.7.	Cronograma de Actividades	43
V.	Análisis y Resultados.....	45
5.1.	Análisis de teorías de sustento	45
5.2.	Pruebas	46
5.2.1.	Ciclo 1 método espiral.....	48
5.2.2.	Ciclo 2 método espiral.....	52

5.2.3.	Ciclo 3 método espiral.....	58
5.2.4.	Ciclo 4 método espiral.....	60
VI.	Conclusiones.....	66
VII.	Recomendaciones.....	67
VIII.	Bibliografía.....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1- Reducción en la producción mundial del café debido a la roya	3
Ilustración 2- Algoritmo de navegación y operación del VR.....	8
Ilustración 3- Guillermo Marconi	10
Ilustración 4- Elementos de un sistema de teleoperación	13
Ilustración 5- Proceso de transmisión de información.....	17
Ilustración 6- Canales de radio	18
Ilustración 7- Transmisión semidúplex	22
Ilustración 8- Transmisión simple	22
Ilustración 9- Transmisión dúplex.....	23
Ilustración 10- Diagrama de bloques de un proceso con un controlador por realimentación.....	24
Ilustración 11- Grafica controlador PI	26
Ilustración 12- Arquitectura interna de los PIC18.....	29
Ilustración 13- Diagrama del modelo en espiral.....	30
Ilustración 14- Diagrama de las variables de investigación.....	37
Ilustración 15- Primera espiral con la implementación de la RF.....	38
Ilustración 16- Segunda espiral con el control de la velocidad del robot.....	40
Ilustración 17- Tercera espiral, control del brazo del robot.....	41
Ilustración 18- Cuarta espiral, pruebas integrales y validación del funcionamiento del robot.....	42
Ilustración 19- Cronograma de actividades	44
Ilustración 20- Diagrama de funcionamiento del sistema.....	47
Ilustración 21- Lectura de señales PWM	50
Ilustración 22- Ancho de pulso de una señal PWM.....	51

Ilustración 23- Diagrama de bloques del PI.....	54
Ilustración 24- Lectura de frecuencia de motores.....	55
Ilustración 25- Grafica del PID ON/OFF.....	56
Ilustración 26- Grafica del PI autentico.....	56
Ilustración 27- Valores de PI en Matlab	57
Ilustración 28- Pruebas del PI en terrenos inclinados.....	57
Ilustración 29- Esquemático de tarjeta	61
Ilustración 30- Esquemático de tarjeta de poder.....	61
Ilustración 31- Algoritmo de funcionamiento general	62
Ilustración 32- Algoritmo de funcionamiento específico	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- resumen de la relación familia-gama en los microcontroladores PIC.....	27
Tabla 2-Actividades Estructurales del Modelo en Espiral.....	31
Tabla 3- Variables de operacionalización	36
Tabla 4- Formato de descripción de pruebas.	46
Tabla 5- Desarrollo de ciclo 1 método espiral.....	48
Tabla 6- Desarrollo de ciclo 2 método espiral.....	52
Tabla 7- Desarrollo de ciclo 3 método espiral	58
Tabla 8- Desarrollo de ciclo 4 método espiral.....	60

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1- Longitud de onda.....	21
Ecuación 2- Velocidad de onda.....	21
Ecuación 3- Periodo.....	21
Ecuación 4- Ecuación controlador PI.....	25
Ecuación 5- Periodo de la onda.....	51
Ecuación 6- Longitud de onda.....	51
Ecuación 7- Revoluciones a la salida de la caja reductora	54
Ecuación 8- Velocidad máxima a la que se desplaza el robot.....	54

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han desarrollado diversos sistemas que permiten al hombre realizar la monitorización a distancia, dentro de estos sistemas se encuentran los robots teleoperados, que, a pesar de no ser autónomos, son controlados por un usuario desde una estación. En el desarrollo de estos robots, se implementan las diferentes áreas de un ingeniero en Mecatrónica, como ser: la electrónica, la comunicación, desarrollo de software y el control. Sin embargo, no existe una solución única en el desarrollo de robots teleoperados, existe una solución para cada entorno, esta cambia según los requerimientos de cada situación. Siendo los algoritmos cada vez más complejos. Muestran como los sistemas de teleoperación pueden ser de fácil manejo para cualquier usuario.

El propósito del presente informe de investigación es exponer el diseño de un sistema electrónico para la comunicación mediante RF que nos permite controlar los movimientos de un robot todo terreno de la manera más sencilla posible para el usuario. Así mismo se integrará un PID para realizar pruebas en campo y comprobar si este es óptimo para el desplazamiento del robot.

En el capítulo II se presenta el planteamiento del problema, seguido del capítulo III donde se exponen las teorías de sustento y el modelo utilizado, para luego presentar la metodología utilizada junto con los hitos fijados para el desarrollo del proyecto. Posteriormente, en la sección IV se exponen los resultados obtenidos del proyecto mencionado. Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo del capítulo es demostrar un panorama vasto con la finalidad de la problemática existente en el control del desplazamiento de un robot todo terreno. Debido a esto, se establecen los precedentes del problema, definición del problema y justificación. Se demostrarán los requerimientos solicitados a partir de las preguntas de investigación y objetivos del proyecto; exponiendo así, las pautas a seguir para el cumplimiento del alcance de este.

2.1. PRECEDENTES DEL PROBLEMA

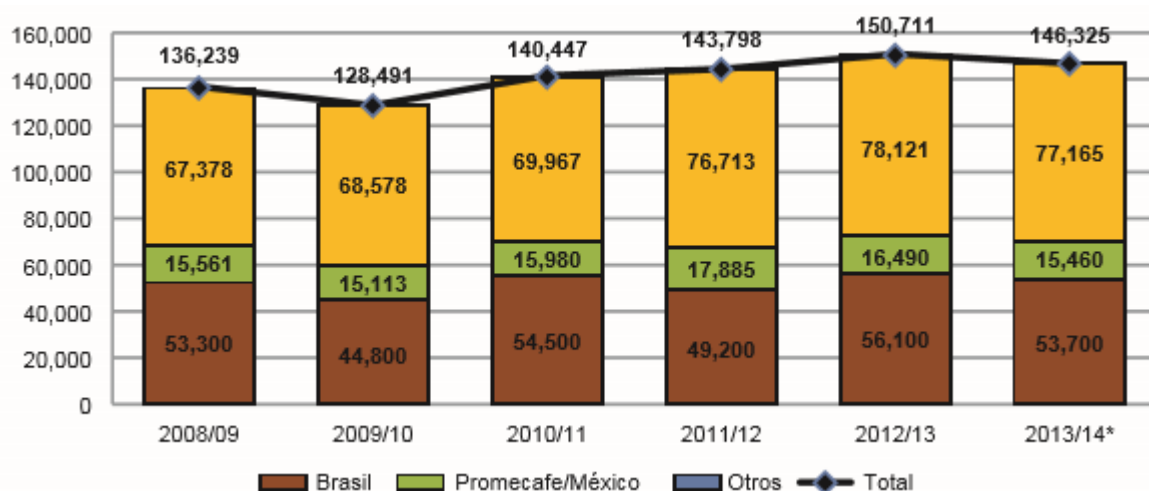
Las fincas de café se han visto perjudicadas por diferentes enfermedades que afectan su producción como ser un hongo (*Hemileia vastatrix*) que produce una enfermedad llamada la roya del café o herrumbre. No es algo nuevo para la región. Esta enfermedad obliga que el café caiga antes de su maduración debido a que debilita las plantas, por eso es considerada como una de las enfermedades más catastróficas en la historia para las plantas.

La roya del café es una enfermedad causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, de fácil diseminación, que se reproduce a través de estructuras llamadas esporas, que se encuentran sobre las manchas o lesiones en el envés de las hojas, donde se observa un polvillo de color amarillo y causa lesiones en las hojas, lo que provoca una defoliación severa a los cafetos durante la época seca. El hongo, mientras esta colonizando la hoja, su ataque pasa inadvertido y generalmente se detecta cuando el patógeno se ha reproducido y está causando la caída de las hojas. (Garcia & Obin, 2019)

El 20% de la producción de café de la región está perdida por la roya en este ciclo cafetero 2018/2019, el daño a la producción y el impacto social serán mayores para la cosecha subsiguiente 2019-2020. Es importante implementar una política cafetalera que incluya elementos eficaces para el combate de la roya, accesibles para todos los productores, financiamientos blandos a plazos adecuados para la renovación del parque cafetero y otros estímulos que impulsen la producción del grano. (Garcia & Obin, 2019)

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) pronostico una disminución del 3% en la producción mundial de café en la cosecha 2013-2014 (véase ilustración 1); significando una

reducción de 4.4 millones de sacos, esto debido al efecto causado por la enfermedad de la roya en las fincas de cafeto en América central y México.



Fuente: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2013).

Ilustración 1- Reducción en la producción mundial del café debido a la roya

Se han desarrollado múltiples proyectos de robots aplicados a la agricultura, uno de estos es el proyecto RHEA (Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management), el cual fue financiado por el séptimo programa Marco de la CE. Se busca diseñar, desarrollar y evaluar una nueva generación de sistemas robotizados para la monitorización física de las fincas. RHEA se centró en dichas aplicaciones por medio de una flota de vehículos terrestres no tripulados (UGV), estos cuentan con sistemas avanzados. El proyecto obtuvo un acierto del 86% para la segmentación de la vegetación.

2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En lo que se refiere a la propagación de ciertos hongos; pueden ser transmitidos a través del viento y la humedad, aumentando la posibilidad en la reproducción de las enfermedades debido a que los pequeños productores no utilizan las prácticas más eficientes, por esta razón es conveniente detectar los brotes lo antes posible. Para ello, se requiere el constante monitoreo de las fincas de café con la implementación de un robot tele operado y por otra parte disminuye la cantidad de personal debido a que es necesario un solo operario para toda la flota.

Torero (2013) afirma:

El especialista del centro Interamericano de políticas alimentarias con sede en Washington asegura que Honduras es el país Centroamericano más afectado por la enfermedad de la roya ya que el rubro del café constituye el 8.5% del Producto Interior Bruto.

La infección por este hongo ocasiona la caída prematura de las hojas y, si, además, hay ataques por insectos, mala fertilización y condiciones de crecimiento deficientes, los cafetos estarán en un continuo estrés y desbalance lo que afectará negativamente la producción. (Digital, 2013)

2.3. JUSTIFICACIÓN

El rubro del café constituye el 8.5 por ciento del producto interno bruto de Honduras, generando 1.5 millones de empleos directos, sumándole un porcentaje alto de empleos indirectos, y estos se encuentran en riesgo debido a las enfermedades que atacan a las fincas de cafeto. Cabe destacar que el principal responsable de la extensión de algunas plagas es el cambio climático.

Debido a la disminución de la producción, la industria ha desarrollado nuevas tecnologías como ser robots capaces de realizar en el campo tareas muy sencillas que requieren poca automatización para proteger los cultivos de ciertas enfermedades. Aunque a priori esta solución puede parecer no rentable debido al alto costo de la maquinaria necesaria en EE. UU. se ha demostrado experimentalmente que sus beneficios netos compensan los costes asociados, realizando un proceso de mayor calidad por dirigirse con precisión a objetivos concretos teniendo en cuenta las características propias de cada campo y tarea. (Rider, Vogel, Dille, Dhuyvetter, & Kastens, 2006)

2.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿Qué modelo de control evitara el retraso en la comunicación entre el usuario y el robot?
- 2) ¿Será el PI menos variable en el tiempo contra el modelo ON/OFF para controlar la potencia suministrada a los motores?
- 3) ¿El brazo robótico debería ser controlado directamente desde el dispositivo de control o usar un microcontrolador en el receptor para manipular la señal?

- 4) ¿Se lograrán superar los diferentes terrenos accidentados con un sistema de cuatro ruedas?

2.5. OBJETIVOS

Se fijarán los objetivos a cumplir, dividiendo estos en objetivo general, el cual describe de manera general lo que se pretende desarrollar como investigación y objetivos específicos, en lo que se refiere a puntualizar las acciones del objetivo general estipulando una dirección concreta para el correcto desarrollo de un sistema de control para robots tele operados.

2.5.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el sistema electrónico para el control de los mecanismos de un robot todo terreno mediante comunicación por RF.

2.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Identificar un modelo de control que evite la problemática del retraso en la comunicación entre el usuario y el robot.
- 2) Desarrollar un PI mediante software y un modelo ON/OFF para identificar qué modelo tiene una variación mínima en el tiempo y aplicarlo al control de la velocidad del robot.
- 3) Realizar pruebas del brazo robótico siendo manipulado desde el dispositivo de control directamente y siendo manipulado con un microcontrolador como intermediario para recopilar datos y luego comparar estos para identificar el método más estable.
- 4) Realizar pruebas en terrenos accidentados para comprobar si el sistema de cuatro ruedas es adecuado para superar dichos terrenos.

III. MARCO TEÓRICO

El constante monitoreo en las fincas de café es un tema de suma relevancia ya que de estas dependen muchas familias en nuestro país. Dentro del marco teórico describiremos los diferentes factores necesarios para llevar a cabo dicho proyecto. Se enfatizará en la comunicación mediante Radio Frecuencia (RF), el uso de un modelo de control y la interfaz usuario-máquina adecuada para el control del robot.

3.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN

Para el análisis de la situación actual se indagará sobre los entornos que rodean el proyecto, se extraerá información adicional sobre las practicas relacionadas al mismo, proporcionando así un valor agregado al desarrollo del proyecto.

3.1.1. ANÁLISIS DEL MACROENTORNO

Bogotá D.C Colombia

Correa (2005) afirma: "Existen muchas circunstancias en las cuales no es conveniente emplear personas para la realización de algunas labores debido al alto riesgo a que ellos se exponen; por ello se han desarrollado diversas herramientas que permiten reemplazar al ser humano al realizar estas operaciones a distancia."

En la Universidad Militar Nueva Granada se desarrolló un robot que es controlado por medio de un programa interno con el objeto de realizar tareas propias y tener mayor autonomía. En el caso de Colombia existen diversos grupos de investigación dedicados al desarrollo de robots tele operados, un ejemplo de ello, el robot móvil teleoperado I (RMTO I), el cual es controlado a distancia desde una estación de tele operación mediante un enlace de radio frecuencia, así mismo, en dicha estación de encuentra un software desarrollado en lenguaje C++ que permite observar la visión del robot y enviar comandos. Lo novedoso de este robot es la utilización de visión remota. (Cerón, 2005)

En el caso de Colombia, el desarrollo de esta clase de tecnología es muy importante, ya que existen muchas circunstancias en las cuales se emplean operarios para realizar diversas tareas de

alto riesgo, por tal razón es de gran interés la investigación y el desarrollo tecnológico en la ingeniería actual. (Cerón, 2005)

Ecuador

En muchos hogares del cantón Latacunga no se observan aplicaciones tecnológicas para sistemas de vigilancia y protección. Una de las opciones más recomendadas por especialistas, es instalar un sistema de cámaras de seguridad, más aún, si se asocia a la tecnología de la robótica, permitiría a los usuarios monitorear el sistema de seguridad desde sus móviles a través de un robot que pueda recorrer todos los ambientes y por medio del uso de cámaras, transmitir en tiempo real las imágenes. En muchos sectores de dicha ciudad, se requiere tomar medidas para socavar los robos, y la delincuencia, lo que afecta notablemente la calidad de vida de las personas mayormente en los sectores alejados del centro de la ciudad. (Aulestia, Molina, & Talahua, 2012)

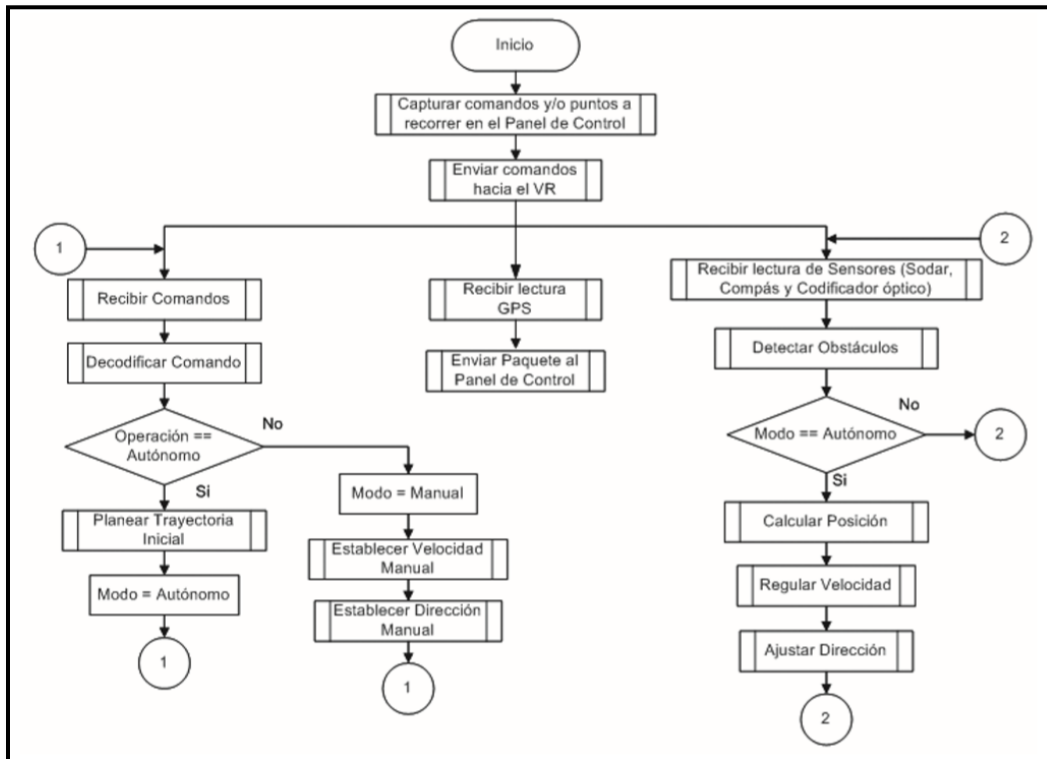
El prototipo consta de un chasis lo suficientemente amplio para transportar la cámara IP, sistemas de tracción conformado por dos servomotores con sus respectivas llantas de caucho para mayor adherencia al terreno, una rueda denominada rueda loca que permite el deslizamiento del prototipo, así mismo el sistema electrónico se conforma de dos tarjetas de control, Arduino uno y Arduino Motor Shield. Para la comunicación a distancia se utilizó el módulo Bluetooth HC-06. (Aulestia, Molina, & Talahua, 2012)

México

El sistema desarrollado para la tele operación de un vehículo robótico (VR) basado en una PDA para su control y supervisión es presentado, así mismo la arquitectura del móvil se basa en un enfoque modular del tipo maestro-esclavo para su operación, tanto en sus componentes lógicos como en sus componentes físicos, para permitir su adaptación en diversas aplicaciones. (Villa, Gutiérrez, & Porta, 2009)

El VR puede ser operado de dos maneras diferentes, autónoma y manual, es posible seleccionar el modo deseado en cualquier momento. El modo autónomo cuenta con una PDA que genera un espacio virtual, este representa la zona de trabajo del VR, donde se establece el recorrido que consiste en dos o más puntos seleccionados, para ir de un punto a otro, se requiere conocer la distancia entre los puntos, además de la orientación de la recta que los une, dicha información es

enviada al VR, el cual toma el control e inicia las acciones requeridas para movilizarse al punto deseado. En modo manual, se utiliza un panel de control simulando un control remoto convencional, este envía la información al esclavo correspondiente, sin realizar cálculos. (Villa, Gutiérrez, & Porta, 2009)



Fuente: Vehículo robótico: autónomo y teleoperado con una PDA (2009).

Ilustración 2- Algoritmo de navegación y operación del VR

3.1.2. ANÁLISIS INTERNO

La roya del café apareció por primera vez en Centroamérica en 1976, pero nunca había afectado la producción tan gravemente como en el ciclo 2012-2013. Cinco países de la región han declarado el brote como emergencia nacional, debido a sus serias repercusiones socioeconómicas, las cuales se han profundizado por la grave baja de los precios del grano. De la superficie total que son 593.037 hectáreas destinadas al cultivo del café en el periodo 2012-2013, en los siete países miembros del PROMECAFE (Guatemala, El Salvador, Honduras, Costa Rica, Panamá, República Dominicana y Jamaica) y en Nicaragua, el 55% ha sido afectada por la roya.

Las pérdidas en el sector cafetalero se han estimado en más de 19% (3,5 millones de sacos de café de 60 kg) o US\$499 millones (16% de la producción total). Mas del 80% de los caficultores son considerados pequeños productores y estos carecen de fuentes alternas de ingresos. Debido al brote de esta enfermedad se estima que se han desplazado 373.584 trabajadores. Cerca de 1,9 millones de personas dependen del rubro del café para su sustento. (García, Day, Hatch, & Andrews, 2013)

En Honduras las autoridades del Instituto Hondureño del café (IHCAFE) informaron que se identifican 13 razas de roya que afectan las plantaciones de cafeto del país. Debido a esta enfermedad hay pérdidas millonarias en el sector cafetalero. Los expertos coinciden en que el actual brote de roya del café se debe a múltiples factores y que está asociado a prácticas agrícolas inadecuadas, aunadas a eventos climáticos y a los bajos precios del café. Muchos agricultores no han invertido en el manejo de la sombra, fertilización, monitoreo o fumigación, además de que no se han renovado antiguas plantaciones y algunas contienen variedades altamente susceptibles a la roya. (García, Day, Hatch, & Andrews, 2013)

Los robots desarrollados para la agricultura enfrentan difíciles condiciones en su navegación debido a la poca suposición que se puede realizar en los terrenos, siendo dichos terrenos por naturaleza muy accidentados y a su vez encontrando muchos obstáculos, como ser los árboles. En el presente proyecto abordaremos el tema de la monitorización, uno de los causantes del actual brote de la roya. Se realizarán pruebas de mecanismos desarrollados por alumnos de UNITEC en su Proyecto de graduación y validaremos su buen funcionamiento, para el control de estos se desarrollará un sistema electrónico optimo y se hará uso de un PID para la regulación de la potencia en los motores.

3.2. TEORÍAS DE SUSTENTO

A partir de la problemática que presentan las fincas de café, se procede a conocer la teoría de sustento, la cual determina los procesos aplicados para la realización del proyecto. La comunicación es algo esencial para la transferencia de información entre dos puntos, en el presente proyecto se utilizará la radiofrecuencia como enlace de comunicación, en dicho medio la información está implícita en algunos de los parámetros de una señal eléctrica. Por otra parte,

el PID es de mucho beneficio para la regulación de la velocidad a la que se movilizará el robot. Finalmente, el desarrollo de la interfaz usuario-maquina, mediante el cual se especifica los parámetros con los que debe contar el robot para un manejo factible. El desarrollo del proyecto estará sustentado por los procesos antes mencionados, con la finalidad de proporcionar soluciones y mejoras técnicas.

3.2.1. GRANDES MENTES EN LA INVENCIÓN DE LA RADIOCOMUNICACIÓN



Fuente: Wikipedia (2020).

Ilustración 3- Guillermo Marconi

A lo largo de la historia del ser humano, han existido grandes mentes que iniciaron el desarrollo de nuevas tecnologías. De no ser por sus descubrimientos, muchas de las nuevas invenciones no hubiesen sido posible. Un ejemplo de esto es la posibilidad de comunicar un punto "A" con un punto "B" sin la necesidad de cables. Lo que hoy conocemos como radiocomunicación, para establecer el origen de esta podemos distinguir entre la física y la ingeniería.

Desde el punto de vista físico la idea de fenómeno electromagnético nace de la capacidad de relacionar las teorías eléctrica y magnética. En 1819 **Hans Christian Oersted** (físico y químico danés que descubrió la acción magnética de las corrientes eléctricas) observó cómo un hilo por el que circulaba corriente hacía que se desviase una aguja imantada, demostrando que la electricidad producía magnetismo. Un años después **André Marie Ampère** (inventó el primer

telégrafo eléctrico y apporto al desarrollo del primer electroimán) amplio estas observaciones. Como consecuencia de los trabajos de Oersted y Ampère se descubrió que una corriente eléctrica tiene efectos magnéticos idénticos a los que produce un imán. De la misma manera existen fuerzas entre alambres que conducen corrientes eléctricas. En 1831 **Michael Faraday** (físico y químico británico, sus principales descubrimientos incluyen la inducción electromagnética, el diamagnetismo y la electrolisis) profundizo en el efecto inverso, por el que un campo magnético induce corriente en un hilo conductor próximo. Pero esto solo ocurría si el campo magnético era variable. (Murillo Fuentes, 2013)

Estos son los precedentes del trabajo realizado por **James Clark Maxwell** (físico teórico y matemático escocés, famoso por producir el conjunto de "Ecuaciones de Maxwell", estas explican las propiedades de los campos magnéticos y eléctricos, mostrando que la luz es una onda electromagnética) que comienzan en 1854 en el Kings College of London y culminan con la publicación del "Treatise on Electricity and Magnetism" en 1873. Maxwell, además de incluir las ecuaciones necesarias para relacionar estos campos, introdujo el concepto de corriente de desplazamiento y postulo la naturaleza electromagnética de la luz. Marcando de alguna forma, el comienzo de la teoría electromagnética. Lo ciertamente sorprendente es que Maxwell no desarrollo una teoría con un modelo matemático desarrollado para dar respuesta a una experimentación exhaustiva de un fenómeno físico. Por el contrario, esta teoría predijo y modeló el efecto electromagnético veinte años antes de que en 1887 **Heinrich Rudolf Hertz** (físico alemán, descubrió la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio) demostrase experimentalmente la propagación de ondas electromagnéticas. Hertz no tuvo el acierto de explotar el potencial de su esquema transmisor-receptor. Ejemplificando esto tenemos la conversación con uno de sus alumnos en la Universidad de Bonn. Donde el afirma que de momento tan interesante fenómeno no tenía ninguna utilidad, dándole el mérito al maestro Maxwell de su acierto con las misteriosas ondas electromagnéticas. Hacía falta un avance decisivo para que se explotase el fenómeno electromagnético en las radiotelecomunicaciones. Este avance vino de la mano del "cohesor". Este dispositivo es un tubo de cristal relleno de partículas metálicas que presenta una resistencia baja en presencia de una descarga eléctrica cercana. Si ésta es ocasionada por la presencia de una onda electromagnética y el cohesor esta convenientemente

alimentado y conectado a una lámpara o timbre, se puede detectar la presencia de una transmisión. Siendo uno de los primeros diseños propuestos por **Édouard Branly** (físico e inventor francés, aporó a las telegrafías sin hilos e inventó el cohesor) en 1891, seguido de esto en 1894 **Tesla** (físico, matemático, ingeniero eléctrico e inventor croata, considerado el verdadero padre de la electricidad) en EEUU, **Popov** (inventor de la antena, logrando hacer transmisiones de ondas electromagnéticas, continuó así los experimentos de Hertz) y **Marconi** (empresario, ingeniero eléctrico e inventor italiano, uno de los más destacados impulsores de la radiocomunicación con el establecimiento de la Ley de Marconi) en Italia-Reino Unido pasaron de la física a la ingeniería realizando las primeras transmisiones de mensajes morse, nace la telegrafía sin hilos y con ella la radiocomunicación. (Murillo Fuentes, 2013)

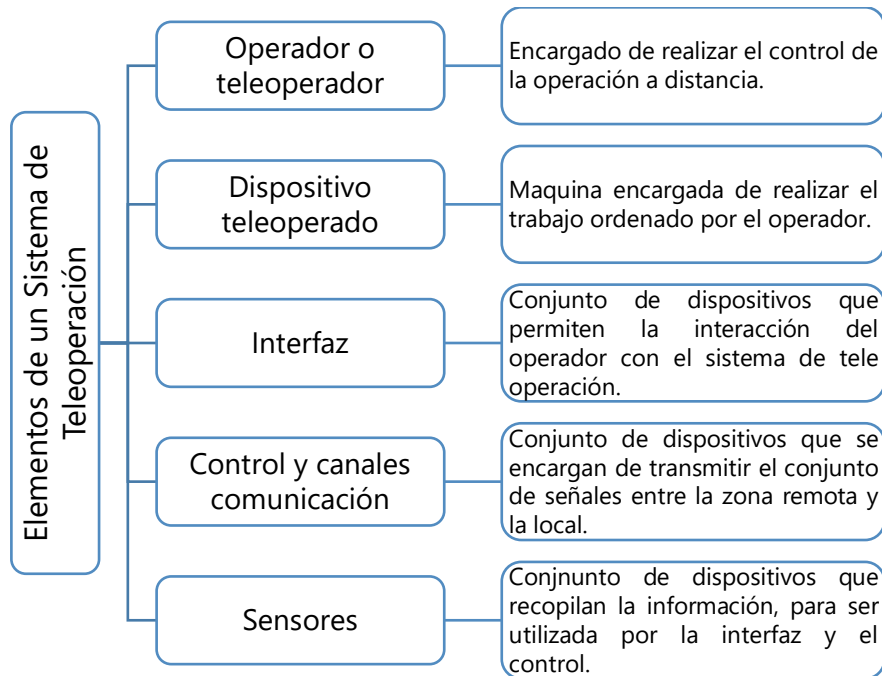
Marconi inventó la telegrafía sin hilos en diciembre de 1901, pero no trabajó en la radio hasta 1913, tal y como señala él en un documento de la época. Lo que no es aceptado tan universalmente es el del nombre del inventor de la radiotelefonía que se atribuye a John Ambrose Fleming, a Lee de Forest, a Fessenden o a David Sarnoff. (Crespo Cadenas, 2008)

Gracias al descubrimiento de las grandes mentes mencionadas anteriormente, es posible la realización de la teleoperación desde grandes distancias y sin la necesidad de cables para la comunicación. Dicho esto, se procede a explicar en qué consta la teleoperación.

3.2.2. TELEOPERACIÓN

Desde tiempos remotos, el hombre ha venido evolucionando en el manejo a distancia de diferentes mecanismos, estos desarrollos desembocaron en lo que hoy en día son los sistemas de teleoperación, por medio del cual un manipulador denominado esclavo reproduce movimientos de un dispositivo maestro, siendo manualmente controlado por un humano.

Debido a que en ocasiones el monitoreo se lleva a cabo de forma remota, es necesario implementar un sistema de visualización que permita tener un conocimiento del estado de las variables sensadas en el lugar donde se está ejecutando el proceso. (Guerra, Pardo, & Rodríguez, 2012)



Fuente: Elaboración propia, información Ortega (2004).

Ilustración 4- Elementos de un sistema de teleoperación

En la ilustración 13 se establecen los elementos necesarios para un sistema de teleoperación. Desde los primeros desarrollos de la teleoperación, la industria nuclear ha sido el principal consumidor de sistemas de teleoperación. Sin embargo, con el paso de los años se fue viendo su aplicabilidad a otros sectores, especialmente relacionados con las industrias de servicio. Con referencia a lo anterior, las aplicaciones en el espacio con razones para usar la teleoperación como técnica de manipulación remota como ser, seguridad, tomando en cuenta que todas las operaciones espaciales son de alto riesgo, que pueden ser la causa de muerte para los astronautas; costo, ya que el equipo necesario para los pasajeros humanos es mucho mas caro y pesado que un sistema de teleoperación y finalmente el tiempo, debido a que hay misiones que duran muchos años para lograr sus objetivos, haciendo misiones sin tripulación humana. (Nuño Ortega, 2004) La teleoperación en el espacio tiene el reto añadido de tener que trabajar con retardos temporales en las comunicaciones, lo que las hace especialmente problematicas. Entre sus principales aplicaciones están: experimentación y exploración planetaria, mantenimiento y operación de satélites, construcción y mantenimiento de estaciones espaciales. Para ilustrar esto, el primer vehiculo teleoperado en la luna fue lunakhode 1 (Rusia), el problema con la aplicación

de teleoperación espacial, es que existe un retardo en sus sistemas de control de lazo cerrado, haciendo inestable la comunicación. (Nuño Ortega, 2004)

En general, los sistemas de teleoperación están compuestos por un sitio local, donde un operador maneja un manipulador denominado maestro; un sitio remoto, donde un manipulador llamado esclavo interactúa con el mundo físico; y un canal de comunicación que vincula ambos sitios. El maestro es utilizado para generar comandos hacia el manipulador remoto, mientras que la fuerza, debida a la interacción dinámica entre el esclavo y el medio, es relativamente hacia el operador humano, lo cual mejora el desempeño de una gran cantidad de tareas en interacción. (Sheridan T. , 1992)

En lo que se refiere a la teleoperación, ha demostrado ser una herramienta muy útil, permitiendo al ser humano realizar tareas en zonas lejanas o que ponen en riesgo la integridad del mismo, asimismo ampliando nuestras posibilidades. Se conocen muchas aplicaciones para la teleoperación, para ejemplificar tales aplicaciones se mencionan las más comunes (Ortega, 2013):

- Exploración del espacio: la tarea de explorar el espacio, resulta de alto riesgo para el ser humano. Al mismo tiempo resulta de menor costo enviar máquinas susceptibles de ser teleoperadas. Tomando en cuenta el retardo que existe en las comunicaciones, se han solventado mediante el método de "mueve y espera".
- Ejército: la mayoría de las tecnologías de teleoperación fueron desarrolladas para aplicaciones militares, siendo estas de gran ayuda para la vigilancia, reconocimiento de zonas peligrosas e, incluso, llevando a cabo ataques a objetivos deseados. Un ejemplo de este tipo de vehículos es el US Air Force Predator.
- Industria nuclear: debido al alto riesgo que representa la manipulación de sustancias radioactivas para el ser humano, se han desarrollado robots capaces de experimentar con sustancias radioactivas, operación en instalaciones de elaboración de combustible nuclear, descontaminación de instalaciones, etc.
- Aplicaciones submarinas: el mundo submarino es el menos explorado por el ser humano, esto debido a la imposibilidad que representa el llegar a determinadas profundidades, la teleoperación brinda una solución factible para explorar los fondos marinos. Un claro

ejemplo de estos robots es el vehiculo JASON, capaz de llegar a profundidades de hasta 500 km.

- Medicina: en los ultimos años se han desarrollado multiples tecnologias de la teleoperación en el sector medico, un claro ejemplo de esto es la telecirugia, esta consta de la operación de pacientes a distancia, sin importar que existan kilometros de distancia entre el paciente y el médico. Actualmente el sistema quirúrgico Da Vinci es considerado el robot cirujano más avanzado, realizando cualquier operación que pueda ser realizada por laparoscopia.
- Humanoides: se han desarrollado multiples humanoides para diferentes aplicaciones, como ser el caso de Telesar V. Con dicho robot se logra ver, sentir y oír el entorno donde este se encuentra, haciendo uso de un casco especial y una serie de sensores que captan los movimientos del cuerpo.

Los robots de servicio son sistemas mecatrónicos generalmente diseñados para una aplicación concreta. Sin embargo, a pesar de las diferencias en su estructura fisica, estos comparten componentes comunes. (Ortiz, Álvares, Sánchez, & Alonso, 2005) como ser los dispositivos de control y los dispositivos de realimentación expuesto a continuación.

3.2.3. DISPOSITIVOS DE CONTROL

Se considera dispositivo de control a las instalaciones inteligentes que contienen, una entrada, un proceso de transmisión y una salida de regulación. Dentro de estos se diferencian dos tipos: dispositivos que generan comandos de bajo nivel y los que generan comandos de alto nivel. Descritos a continuación (Ballesteros, 2012):

- Dispositivos que generan comandos de bajo nivel: estos se encuentran relacionados al movimiento de las articulaciones del robot, generando así las referencias para controlar de manera directa los servomotores de un robot. Un ejemplo de esto es el joystick, consiste en una palanca con dos o tres ejes, siendo muy eficaz para el control de los vehículos teleoperados. Por otra parte, se describen las interfaces corporales, se basan en detectar la posición del cuerpo del operador y utilizar dicha información para mover el robot. Comúnmente es utilizado para el control de robots humanoides. Para obtener la

postura del teleoperador, se utilizan exoesqueletos, trajes de captura de movimiento o técnicas de visión artificial.

- Dispositivos que generan comandos de alto nivel: se refieren a tareas a realizar. A diferencia de los dispositivos que generan comando de bajo nivel, estos no controlan en cada momento la posición de las articulaciones del robot, no obstante, se le envían órdenes más complejas que es capaz de realizar autónomamente. Esta clase de control es muy utilizado en sistemas en los que existe la problemática del retardo, como las misiones espaciales. Para ejemplificar dichos dispositivos, resulta oportuno mencionar las interfaces visuales, estas interfaces pueden ser controladas con teclado y ratón desde un computador. Suelen consistir en paneles de botones y campos de texto en los que insertar parámetros.

Para lograr el control óptimo del robot, existen tres tipos diferentes de rutinas o subprogramas posibles (Díaz Celis & Romero, 2012):

- Procedimiento: rutina que no devuelve ningún valor y es utilizado como una instrucción.
- Función: rutina que devuelve un dato de tipo específico y es utilizado como una expresión.
- Rutina TRAP: rutinas asociadas a interrupciones y ejecutadas cuando éstas se activan.

3.2.4. DISPOSITIVOS DE REALIMENTACIÓN

Los dispositivos de realimentación son los encargados de percibir el ambiente alrededor de los vehículos teleoperados, de esta manera el teleoperador es capaz de percibir el entorno del vehículo.

Los sentidos utilizados habitualmente en la teleoperación son los siguientes (Minguez & Escolano, 2011):

- Vista: normalmente está constituida por cámaras situadas en el robot, estas nos ayudan a conocer el entorno del robot, adicionalmente nos da ventaja para llevar a cabo las tareas deseadas.
- Tacto: Ballesteros (2012) afirma que este, se basa en transmitir al operador las fuerzas que se están produciendo en el dispositivo teleoperado. De esta manera, reconocer cuando

una articulación ha interferido con algún elemento de su entorno o, incluso, apreciar la forma y textura de un objeto que haya cogido el robot.

- Oído: se trata de un dispositivo poco utilizado, considerándose un método pasivo debido a la poca atención que requiere del operador.

Para la selección de los sensores se debe determinar previamente cuáles son los movimientos para censarse en el robot. Es de vital importancia seleccionar los sensores de acuerdo con la aplicación que deseamos implementar. (Herrera, Zambrano, & Silva, 2012) Para lograr la teleoperación de nuestro robot es de vital importancia entender la radiocomunicación.

3.2.5. RADIOCOMUNICACIÓN

El objetivo de la radiocomunicación no es otro que el de establecer un enlace sin cables entre dos puntos que permita la transmisión de información. Esta idea lleva asociada una serie de retos científicos y tecnológicos que de manera sencilla se resumen en utilizar los campos electromagnéticos para que en el seno de nuestra sociedad se puedan satisfacer las necesidades de transmisión de información con las máximas velocidades de transmisión posibles. La mayor limitación a la que se enfrenta la radiocomunicación es la limitación de recursos. La información se transmite modulando una portadora. O lo que es mismo, transmitiendo un seno o tono a frecuencia determinada, la frecuencia portadora, y haciendo que la información varíe sus parámetros, amplitud y fase. En el receptor, se captan estas variaciones y se recupera esta información. (Arroyave, y otros, 2006)



Fuente: Propia (2020).

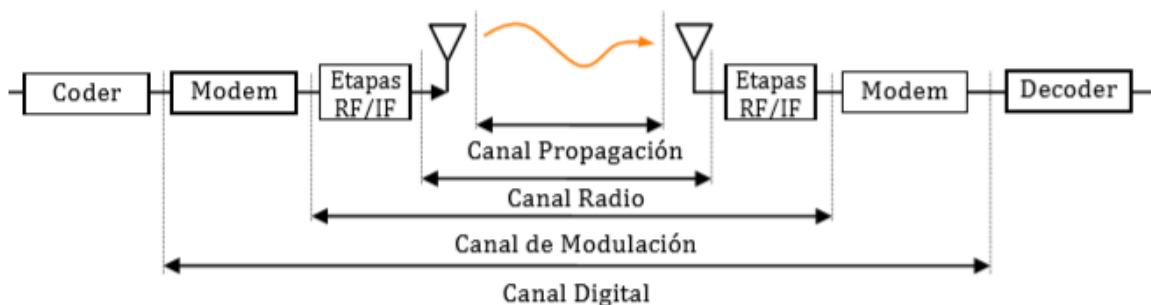
Ilustración 5- Proceso de transmisión de información

Todas las tecnologías que hacen realidad la comunicación permanente descansan en la transmisión inalámbrica por radio. La mayoría de las personas hacen uso de este universo de comunicaciones inalámbricas sin plantearse la pregunta de cómo funciona, el ingeniero debe responder a otra pregunta: ¿dónde utilizarlo y por qué? (Crespo Cadenas, 2008)

Para la radiocomunicación es necesario un medio para la transmisión de información, mejor conocido como canal de radio.

3.2.6. CANALES DE RADIO

A diferencia del concepto de porción del espectro donde se realiza la transmisión, se puede definir canal como el enlace entre dos puntos de un trayecto de comunicaciones. Este canal se puede describir a través de sus propiedades: Lineal, recíproco e invariante en el tiempo. (Murillo Fuentes, 2013) Dentro del sistemas de comunicaciones hay diferentes canales (véase ilustración 4): Canal de Propagación, Canal Radio, Canal de Modulación y Canal Digital. En el Canal de Modulación se abarcan las etapas de RF. Eso incluye los amplificadores, mezcladores y filtros. En general ninguno de los tres es recíproco y por ello tampoco lo es el canal. Por otro lado, el canal será lineal en la medida en que las conversiones de frecuencia y las amplificaciones lo sean. Esto dependerá en gran medida de la modulación utilizada. En general, las modulaciones digitales multinivel son más sensibles a las no-linealidades. Las modulaciones de amplitud constante lo son en menor medida. (Murillo Fuentes, 2013)



Fuente: Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación (2013).

Ilustración 6- Canales de radio

La existencia del medio para transmitir nuestra información no es lo único indispensable, ya que es necesario conocer sobre las antenas para obtener las distancias a las que queremos transmitir.

3.2.7. ANTENAS

La antena es un elemento que permite radiar, una energía en forma de onda electromagnética. Las propiedades de una antena en transmisión son las mismas que las de una antena en la recepción. Por lo que, en vez de radiar, la antena puede recibir esta radiación que, una vez guiada hasta el receptor, se traducirá en energía eléctrica. Esto permite el diseño de variados sistemas de radiocomunicación, con la característica de movilidad como máximo exponente de este tipo de comunicaciones. (Murillo Fuentes, 2013)

Cuando la antena recibe la energía de radiofrecuencia del transmisor, se producen variaciones de voltaje y corriente a todo lo largo de ella, dando como resultado la producción de un campo electromagnético que es radiado por la antena. Para que esto suceda, la antena debe estar en resonancia con el emisor y esto solo se consigue cuando la longitud física coincide con un submúltiplo de la longitud de onda radiada. (Suay Belenguer, 2002)

El tamaño de las antenas está relacionado con la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia que es transmitida o recibida, debiendo ser, de manera general, un múltiplo o submúltiplo exacto de esta longitud de onda. Como consecuencia de esto, a medida que se van utilizando frecuencias mayores, las antenas van disminuyendo su tamaño. Para continuar, dependiendo de su forma y orientación, pueden captar diferentes frecuencias, así como niveles de intensidad. (SANVALERO, 2014)

Existen diferentes tipos de antenas, como ser: antena isotrópica, esta radia con igual intensidad en todas las direcciones. Antena directiva, radiando con más intensidad en determinadas direcciones. Antena omnidireccional, siendo una aproximación al concepto de antena isotrópica. (SANVALERO, 2014)

Sin importar que longitud de antena utilicemos, siempre existirán ruidos en la comunicación. Ya pueden ser por interferencias o por obstáculos en el camino de sus canales de radio.

3.2.8. RUIDOS

El ruido es una parte de la radiocomunicación que debemos de tener en cuenta para el diseño de nuestro sistema. En el transmisor el ruido no es algo que debemos de tomar en cuenta, ya que en la conversión de frecuencia se trabaja a altos niveles y a la antena llega una señal amplificada por una etapa de alta potencia. Sin embargo, en el receptor el nivel de señal que recibe es bajo. Por este motivo la magnitud de la señal recibida es la misma que la del ruido y se debe comprobar que esto no afecte a la señal. (Murillo Fuentes, 2013)

En el sistema se pueden percibir diferentes tipos de ruidos como ser:

Ruido térmico: este es el originado por el movimiento browniano de los electrones de un conductor. Los electrones se mueven aleatoriamente, en cualquier dirección y sentido. A mayor temperatura su movimiento crece, debido al incremento de energía. El desplazamiento neto es cero, puesto que unos electrones se mueven para un lado, pero otros se mueven para el lado contrario. Sin embargo, si hay un vaivén de energía que superpuesto a la señal de interés provoca una interferencia. (Murillo Fuentes, 2013)

Ruido en resistencias: en general, cualquier conductor con una resistencia R es considerado un generador de ruido térmico. Siempre que transmitimos información entre dos puntos, debemos considerar ciertas características que debe poseer el transmisor de dicha información.

3.2.9. CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR

Al asegurar que el transmisor funciona correctamente en radiofrecuencia (RF), cabe pensar que medidas deberíamos llevar a cabo. El objetivo es transmitir una determinada potencia de señal en un determinado canal sin emitir potencia fuera del mismo. Para ello hay que asegurar que la potencia no es ni superior, para cumplir con los límites administrativos, ni inferior a la que se le indique al equipo, para tener la cobertura o alcance deseado. Por otra parte, la frecuencia central del canal no debe desplazarse de la indicada. El ancho de banda también tiene que estar acotado, para no invadir los canales adyacentes. Y por último el transmisor no debería de radiar potencia fuera del canal, debido por ejemplo a no linealidades en el transmisor. Todas estas características se materializan en la recomendación en las siguientes medidas: Desplazamiento de frecuencia

(tolerancia), potencia de portadora del transmisor, desviación de frecuencia (para $f_m < 3kHz$), desviación de frecuencia ($f_m > 3kHz$) y emisiones no esenciales. (Murillo Fuentes, 2013)

Una vez expuestos todos los conceptos anteriores, cabe destacar que dentro de la radiocomunicación se encuentra el termino radio frecuencia, el cual es de vital importancia para la realización de nuestra teleoperación, ya que esta da ventajas sobre otros medios de comunicación como ser, su estabilidad, su largo alcance y su fácil implementación.

3.2.10. RADIO FRECUENCIA

Existen diferentes medios de comunicación entre ellos: Cables eléctricos, señales ópticas y ondas electromagnéticas. Entendiendo más en el medio de las ondas electromagnéticas es el entorno de un conductor por el que circula una corriente, aparecen dos campos de fuerza perpendiculares entre sí: uno eléctrico y otro magnético. El conjunto de estos se denomina campo electromagnético, dicho campo se propaga a la velocidad de la luz ($C = 3 * 10^8 m/s$) en dirección perpendicular a los dos campos. (SANVALERO, 2014)

Existen diferentes parámetros para las ondas electromagnéticas, como ser: longitud de onda (distancia entre dos crestas de una onda) representada en la ecuación 2, periodo mostrado en la ecuación 4, frecuencia y la velocidad (ver ecuación 3).

$$\lambda = C * T$$

Ecuación 1- Longitud de onda

$$C = \lambda * f \cong 3 * 10^8 \frac{m}{s}$$

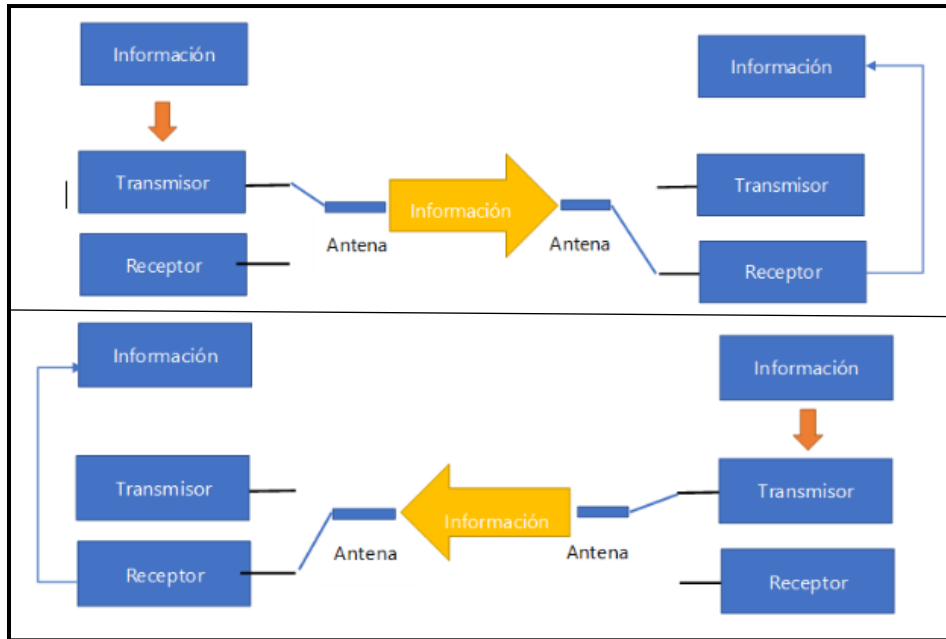
Ecuación 2- Velocidad de onda

$$T = \frac{1}{f}$$

Ecuación 3- Periodo

Se identifican diferentes modos de transmitir información de un punto a otro, como ser las que se presentan a continuación:

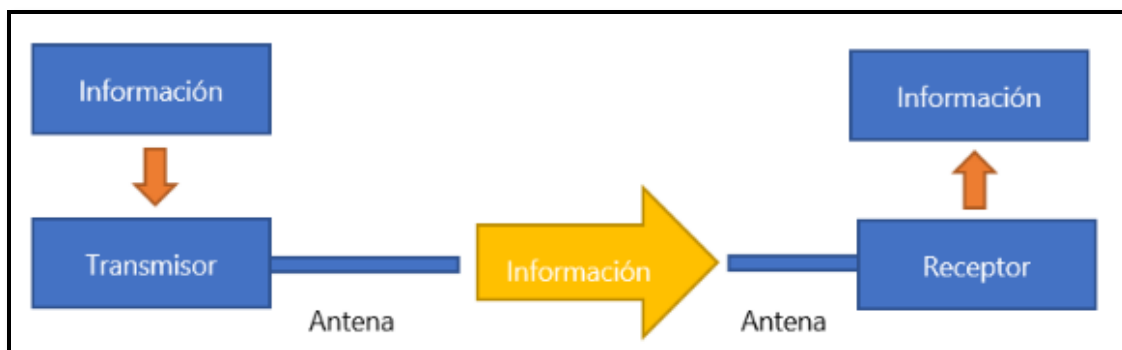
- Transmisión semidúplex: Posibilita la transmisión de transmisor a receptor y viceversa, alternando con un conmutador el sentido en el que viajara la información.



Fuente: Propia (2020).

Ilustración 7- Transmisión semidúplex

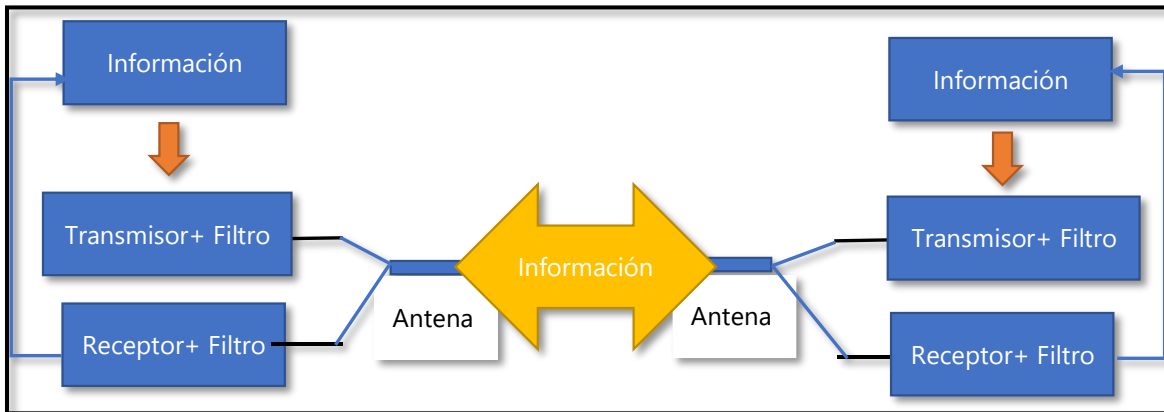
- Transmisión simple: en este modo se puede transmitir información en un solo sentido, del transmisor al receptor sin la posibilidad de recibir una respuesta del receptor.



Fuente: Propia (2020).

Ilustración 8- Transmisión simple

- Transmisión dúplex: Permite la comunicación simultánea en ambos sentidos, haciendo uso de filtros para separar los mensajes. Es considerado el modo de comunicación más eficiente.



Fuente: Propia (2020).

Ilustración 9- Transmisión dúplex

Por su parte se encuentra el espectro de las ondas electromagnéticas, todos los cuerpos emiten radiación, dicha radiación depende de la energía que posee cada cuerpo: como ejemplo, el sol emite con una energía diferente a la de una lámpara, aunque su función sea la misma. La luz es una onda electromagnética, así como las ondas de radio. Todas las ondas diferentes se encuentran agrupadas en un espectro que contiene todo el rango de radiación desde la luz visible hasta la no visible. (SANVALERO, 2014)

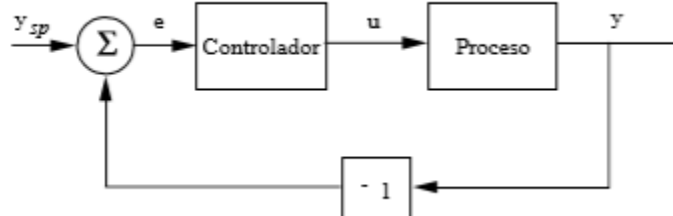
En los sistemas de comunicación, navegación o emisión de televisión se trabaja con frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 3,000 MHz, que expresado en longitud de onda es de 1 m a 0,1 m. Atendiendo al término de longitud de onda se utiliza cuando se habla de ondas que se transmiten por aire, como ejemplo las ondas de radio o televisión y que poseen una frecuencia muy elevada. Resulta más fácil definir las ondas por su longitud que es la distancia que recorre un ciclo completo de la onda en el espacio. Con esto percibimos una idea de su velocidad y frecuencia, cuanto mayor es la frecuencia, menor será la longitud de onda. (SANVALERO, 2014)

Para dar continuidad, el alcance de las ondas electromagnéticas depende de la naturaleza del suelo, de la frecuencia y de la potencia de emisión. Parte de la energía emitida es absorbida por el suelo, provocando así corrientes inducidas. La absorción de la energía es mayor con polarización horizontal. Se concluye que, a mayor conductividad, mayor alcance. Se tiene en cuenta que la conductividad de un terreno boscoso es menor a la de un suelo urbano o a la conductividad que existe en agua salada. (SANVALERO, 2014)

No sería posible transmitir la información que deseamos si no fuera por la modulación, el objetivo de esta es introducir la información en una onda portadora apta para ser transmitida, actuando, así como vehículo de la información. Dicha información viaja en la portadora con algunas de sus parámetros, como ser a amplitud, frecuencia y su fase.

Conociendo los diferentes factores para la comunicación por radiofrecuencia, se encuentra la secuencia necesaria: producir la información, seguido de codificarla convirtiéndola en un mensaje, luego se modula y es enviada, procediendo a la propagación, para luego ser recibida y decodificada, finalizando con la amplificación y la regeneración.

3.2.11. MÉTODOS DE CONTROL



Fuente: Control PID avanzado (2009).

Ilustración 10- Diagrama de bloques de un proceso con un controlador por realimentación.

El PID es un control que combina tres términos que son: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Gracias a esto se considera la solución más común a los problemas prácticos de control. Aunque controladores con acción proporcional e integral han sido utilizados desde la época en que los molinos de viento y las máquinas de vapor eran las tecnologías dominantes, la forma actual del controlador PID emergió con los controladores neumáticos en los años 30 del siglo

pasado. (Aström & Hägglund, 2009) Muchos miles de ingenieros de instrumentación y control en todo el mundo están usando tales controladores en su trabajo diario.

3.2.11.1. Control proporcional

Se conoce un método de control denominado ON/OFF, este da lugar a oscilaciones debido a que el sistema sobreactúa, ya que un pequeño cambio en el error hará que la variable manipulada varíe entre los valores máximos. Dicho efecto se evita en el control proporcional, donde la característica del controlador es proporcional al error de control para pequeños errores. (Aström & Hägglund, 2009)

3.2.11.2. Control integral

Se conoce que el control proporcional tiene la desventaja de que la variable de proceso a menudo se desvía del punto seteado. Esto se puede evitar haciendo la acción de control proporcional a la integral del error. Esta estrategia es denominada control integral. El control integral tiene una propiedad sorprendente. Encontrando que si hay estado estacionario y un controlador tiene acción integral, el error en estado estacionario será siempre cero. Esto aplica también para el controlador PI y es una de las razones de por qué los controladores PI son tan comunes.

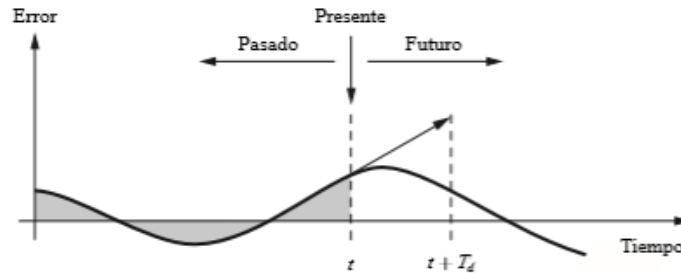
3.2.11.3. Controlador PI

$$u(t) = Ke(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Ecuación 4- Ecuación controlador PI

El controlador I suele ser el adecuado para controlar procesos estables siempre que los requisitos sean modestos. La acción proporcional mejora adicionalmente el comportamiento. No es por lo tanto sorprendente que el controlador PI sea el controlador más común. Sin tomar en cuenta las saturaciones, a un proceso con dinámica de primer orden se le puede dar un comportamiento deseado utilizando un controlador PI. La acción derivativa no se suele utilizar. Es una observación interesante que muchos controladores industriales solo utilizan acción PI y que además en otros la acción derivativa puede desconectarse. (Aström & Hägglund, 2009)

Un doble integrador no se puede controlar por un controlador PI. La razón es que el proceso tiene un desfase de 180° y que un controlador PI también tiene un desfase. Es necesario la acción derivativa para dichos procesos. Similarmente, el control PID es suficiente para procesos donde las dinámicas dominantes son de segundo orden. Para tales procesos no se obtiene ningún beneficio utilizando un controlador más complejo. La acción derivativa se utiliza con el beneficio de acelerar la respuesta de nuestro control. (Aström & Hägglund, 2009)



Fuente: Control PID avanzado (2009).

Ilustración 11- Grafica controlador PI

Todas las funciones mencionadas serán procesadas por un cerebro denominado microcontrolador, en nuestro caso el PIC.

3.2.12. MICROCONTROLADORES PIC

Los microcontroladores fueron desarrollados para cubrir diversas aplicaciones. Puede ser utilizados en automoción, en equipos de comunicaciones y de telefonía, en instrumentos electrónicos, en equipos médicos e industriales de todo tipo, en electrodomésticos, en juguetes, etc. Los microcontroladores están fundamentalmente para aplicaciones puntuales, es decir, aplicaciones donde el microcontrolador debe realizar un pequeño número de tareas, al menor costo posible. En dichas aplicaciones, el microcontrolador ejecuta un programa almacenado en su memoria de manera permanente, dicho programa trabaja con algunos datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior a través de sensores y actuadores requeridos para cada aplicación. (Valdés & Pallás, 2007)

Existen varias características que son deseables en un microcontrolador: recursos de entrada y salida, espacio optimizado, el microcontrolador idóneo para ciertas aplicaciones, seguridad en el funcionamiento del microcontrolador, bajo consumo, y protección de los programas frente a

copias. Un microcontrolador combina los recursos fundamentales disponibles en un microcomputador, en un único circuito integrado. (Valdés & Pallás, 2007)

Los microcontroladores PIC están basados en la arquitectura Harvard (configuración de computadora donde los datos y las instrucciones se encuentran en celdas separadas), con memoria de programa y de datos separadas. Como casi todos los microcontroladores, la memoria de programa es mucho mayor que la de datos. Por otra parte, los PIC se pueden clasificar, atendiendo al tamaño de sus instrucciones, en tres grandes grupos o gamas:

- Gama baja: microcontroladores con instrucciones de 12 bits.
- Gama media: microcontroladores con instrucciones de 14 bits.
- Gama alta: microcontroladores con instrucciones de 16 bits y 32 bits.

Estos también se agrupan en seis grandes familias: PIC10, PIC12, PIC16, PIC17, PIC18 y PIC32. (Valdés & Pallás, 2007)

Tabla 1- resumen de la relación familia-gama en los microcontroladores PIC.

Familia	Gama			Rasgo distintivo
	Baja	Media	Alta	
PIC10	X			6 terminales
PIC12X5	X			8 terminales
PIC12 (excepto PIC12X5)		X		8 terminales
PIC16X5	X			-
PIC16 (excepto PIC16X5)		X		-
PIC17			X	-
PIC18			X	Gama alta mejorada
PIC32			X	-

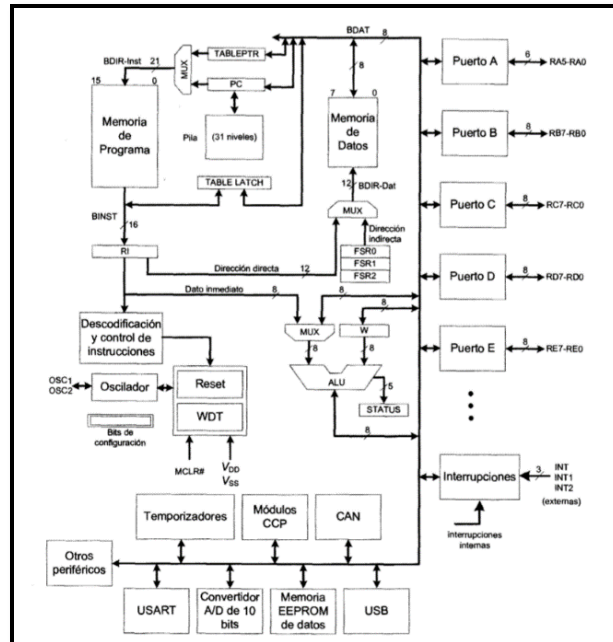
Fuente: Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC (2007).

Microcontroladores de gama baja: estos disponen de un repertorio de 33 instrucciones de 12 bits cada una. La memoria de programa tiene una capacidad de hasta 2k palabras de 12 bits y está organizada en páginas de 512 palabras cada una. Por otra parte, los PIC de gama baja tienen una pila de dos niveles, para guardar direcciones de la memoria de programa. No tienen interrupciones. Contienen una pequeña cantidad de puertos para dispositivos, que comprende hasta tres puertos de entrada y salida de hasta 8 bits cada uno, un temporizador y un comparador. (Valdés & Pallás, 2007)

Microcontroladores de gama media: estos dispositivos tienen un repertorio de 35 instrucciones de 14 bits cada una. La memoria de programa puede llegar a las 8k palabras de 14 bits y se organiza en páginas de 2k palabras cada una. En general, los PIC de gama media poseen algo de memoria EEPROM de datos. Todos tienen una pila de 8 niveles, donde se almacenan direcciones de la memoria de programa. (Valdés & Pallás, 2007)

Microcontroladores de gama alta: los microcontroladores de gama alta se distinguen por sus instrucciones de 16 bits, mayor profundidad en la pila y un sistema de interrupciones más elaborado que incluye, además de las interrupciones internas de los dispositivos integrados en el microcontrolador, varias entradas para interrupciones externas. Los PIC de gama alta contienen un número de entradas y salidas bastante amplio, siendo mayor que el de los PIC de gama media. Estos están disponibles en dos familias, que comprenden: PIC 17 y PIC18. Los PIC18 constituyen una numerosa familia de microcontroladores, que en su gran mayoría tienen un repertorio de 77 instrucciones de 16 bits. La memoria de programa puede ser de hasta 2MB, y la memoria de datos puede llegar a los 4k registros de 8 bits cada uno. (Valdés & Pallás, 2007)

Varios dispositivos PIC18 están diseñados para trabajar con tensiones bajas (2,0 V a 3,6 V) y con corrientes inferiores a 2 miliamperios. Véase en la ilustración 11 la complejidad de estos microcontroladores. Algunos miembros de la familia PIC18 admiten una expansión externa de la memoria de programa. Poseen una pila de 31 niveles de profundidad, así como un sistema de interrupción muy elaborado, con interrupciones internas provenientes de los dispositivos de entrada y salida integrados en el microcontrolador, y tres interrupciones externas. (MICROCHIP, 2012)



Fuente: Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC (2007).

Ilustración 12- Arquitectura interna de los PIC18

En los microcontroladores PIC de gama alta encontramos el puerto serie USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), este utiliza las terminales TX y RX del microcontrolador, TX es la terminal del transmisor por donde se envía la señal de datos, y RX es la terminal del receptor por donde se recibe la señal de datos.

El funcionamiento del puerto serie USART en modo asíncrono se caracteriza por que permite la comunicación full dúplex. La señal que se envía o recibe está constituida por 8 bits precedidos por el bit de inicio o start con valor 0 y sucedidos por el bit de parada o stop con valor 1. También es posible programar el puerto para que transmita o reciba un noveno bit de datos. (Valdés & Pallás, 2007)

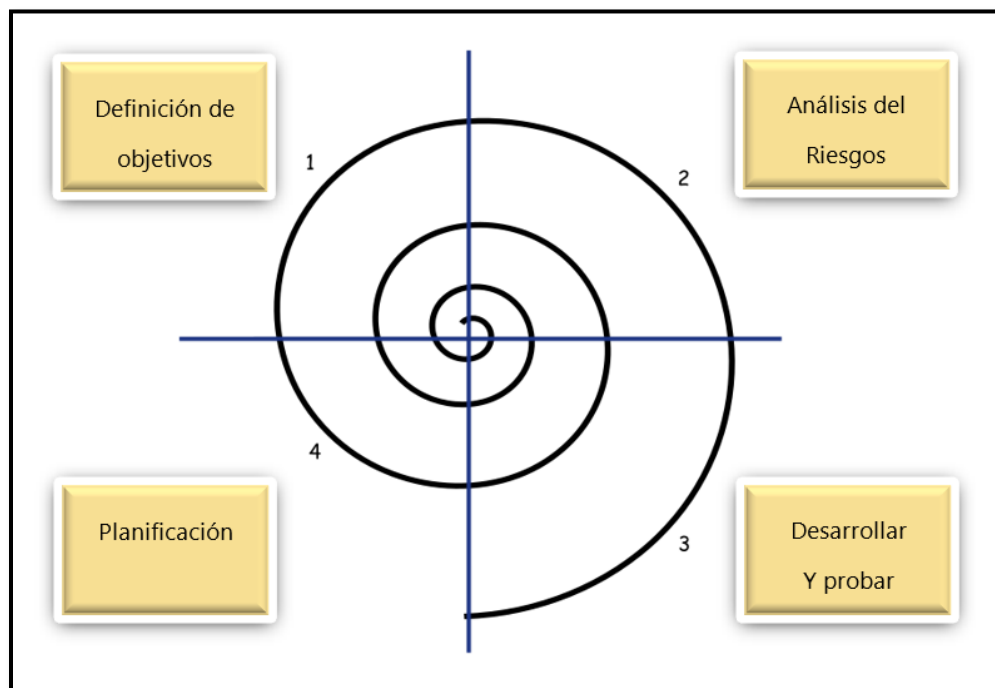
Por otra parte, los microcontroladores cuentan con salidas PWM, estas señales son cuadradas, siendo señales analógicas, para poder variar la señal entregada, solo basta con cambiarles el ancho relativo respecto al periodo de esta. Estas salidas son útiles para controlar la energía que se le suministra a una carga, de esta manera podemos realizar el control de la potencia de diversos dispositivos, como ser, la intensidad de luz que emite un led, y la potencia a la que trabaja un motor DC. (Pérez, Valdés, & Arias, 2013)

3.2.13. MODELO EN ESPIRAL

Para el desarrollo de grandes proyectos es de suma importancia el uso de una metodología que se adapte al mismo. el modelo en espiral toma como su fundamento ser permeable al riesgo, poniendo énfasis donde los demás modelos tienen sus debilidades. Asumiendo el riesgo en cada etapa, y así tomando el control de este.

El modelo en espiral, creado por Barry Boehm, se basa en sucesivas iteraciones hasta cumplir cierto hito o condiciones prefijadas para derivar a partir de allí en los modelos clásicos. A diferencia de la idea de los demás modelos donde los espirales suelen ser hacia el centro, es decir, que los primeros ciclos involucran las tareas más importantes y los ciclos más avanzados tareas de refinamiento hasta llegar al objetivo. (Corcos, 2011)

El modelo en espiral se basa en la ejecución de desarrollo (véase ilustración13), siguiendo cuatro pasos principales, los cuales son (Fariño, 2011):



Fuente: propia (2020).

Ilustración 13- Diagrama del modelo en espiral

1. Determinar o fijar los objetivos: en este paso se definen los objetivos específicos para posteriormente identificar las limitaciones del proceso y del sistema del software, además se diseña una planificación detallada de gestión y se identifican los riesgos.
2. Análisis del riesgo: en este paso se efectúa un análisis detallado para cada uno de los riesgos identificados del proyecto, se definen los pasos a seguir para reducir los riesgos y luego del análisis de estos riesgos se planean estrategias alternativas.
3. Desarrollar, verificar y validar: en este tercer paso, después del análisis de riesgo, se elige un paradigma para el desarrollo del sistema de software y se desarrolla.
4. Planificar: en este último paso es donde el proyecto se revisa y se toma la decisión si se debe continuar con un ciclo posterior al de la espiral. Si se decide continuar, se desarrollan los planes para la siguiente fase del proyecto.

De la misma forma el modelo en espiral esta compartida en varias actividades estructurales, también llamadas regiones de tareas. Describas a continuación (Corcos, 2011):

Tabla 2-Actividades Estructurales del Modelo en Espiral

Etapas	Aspectos que lograr	Actividades
Planificación	Determinación de objetivos, límites y condiciones de contorno (condiciones que limitan de alguna manera el desarrollo, económicas, de tiempo, etc.) y alternativas.	<p>Predecir la duración de las actividades y tareas de nivel individual, recursos requeridos, concurrencia y solapamiento de tareas para el desarrollo en paralelo y camino crítico a través de la red de actividades.</p> <p>Estimar recursos: Predicción de personal, esfuerzo y costo que se requerirán para terminar las actividades y productos conocidos asociados con el proyecto.</p>

Continuación Tabla 2...

		Planificar tareas y solapamiento de actividades y tareas.
		Definir y desarrollar los requerimientos de software.
		Definir los requisitos de interfaz.
		Priorizar e integrar los requisitos de software.
Análisis de riesgo	Desarrollo de un plan para descubrir los riesgos más importantes y resolver los mismos.	Identificar ideas o necesidades. Formular soluciones potenciales.
	Eliminación de aspectos no compatibles con las condiciones, o condiciones de contorno o límites.	Conducir estudios de viabilidad. Planificar la transición del sistema. Refinar y finalizar la idea o necesidad. Analizar las funciones del sistema. Desarrollar la arquitectura del sistema. Descomponer los requisitos del sistema. Planificación de contingencias.

Continuación Tabla 2...

Ingeniería	Desarrollo del producto o prototipo según las condiciones de la etapa anterior.	Realizar el diseño arquitectónico. Analizar el flujo de información. Diseñar la base de datos. Seleccionar o desarrollar algoritmos. Realizar el diseño detallado de la etapa. Crear el código fuente.
Evaluación	Evaluar los resultados del prototipo obtenido, verificar y validar.	Crear los datos de prueba de código fuente. Ejecutar las tareas de verificación y validación. Recoger y analizar los datos de la métrica. Planificar las pruebas. Desarrollar las especificaciones de las pruebas. Ejecutar las pruebas. Generación de los aspectos de mejora, errores, defectos y ampliaciones.

Continuación Tabla 2...

Toma de decisiones	Se determina si se pasa al ciclo exterior o se realiza una nueva iteración.	Evaluación de resultados. Contraste de los hitos fijados o condiciones predeterminadas. Fijación de las condiciones de pasaje a los ciclos externos de no haberlas fijado. Repetición del ciclo o pasaje a otro modelo. Técnicas de toma de decisiones (árboles de decisión, decisiones en condiciones de incertidumbre, etc.).
Refinamiento	Si se toma la decisión de continuar en los ciclos internos se sofistican las condiciones a tomar en cuenta en el planteamiento del nuevo ciclo, en los ciclos exteriores es una etapa que no se utiliza.	No hay actividades específicas, si no aquellas que generan las posibilidades de sofisticar indicadas anteriormente.

Fuente: Corcos (2011).

IV. METODOLOGÍA

La metodología es la explicación de los mecanismos utilizados para el análisis de nuestra problemática de investigación. Sirviendo de guía, ya que a través de métodos, técnicas y procedimientos permite determinar los instrumentos a utilizar para recabar información valiosa para la investigación. El presente proyecto de tesis será una investigación aplicada en base al desarrollo de un sistema electrónico para el control de un robot teleoperado, haciendo uso de las tecnologías adecuadas para que estas sean adaptadas de la mejor manera con el fin de desarrollar un robot capaz de movilizarse a través de terrenos accidentados.

4.1. ENFOQUE

El presente proyecto se ha considerado de enfoque cuantitativo. Debido a que se realizaron análisis de valores numéricos que influyeron de manera directa en el desarrollo del sistema electrónico para el control del robot teleoperado. Llevando a cabo diferentes procedimientos para identificar mediante el análisis una solución. Posteriormente, permite realizar pruebas en campo y obtener soluciones sustentadas.

Cadena, (2017) en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas enuncia que un enfoque cuantitativo es: "donde los eventos de la realidad que se quieren investigar se verifican, se cuantifican y estos pueden darse o no a conocer o se utilizan de alguna manera. En una investigación cuantitativa el investigador debe aplicar de manera adecuada las técnicas, este desarrolla los análisis de acuerdo con los conocimientos científicos y ello no lo hace que contraiga mayor responsabilidad siempre y cuando realice adecuadamente su trabajo". (p.1615)

De la misma manera que se estableció el enfoque de la investigación, se deduce que la presente es de diseño experimental, permitiendo el control total de las variables utilizadas e identificando las relaciones entre estas, para ello se determinan las variantes de estudio, buscando los efectos que causan en otras variables, además hace uso de grupos experimentales.

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

En el siguiente apartado, se mostrarán las variables de investigación, las cuales se identifican por medio de la formulación del problema. El cuadro de variables de operacionalización resume

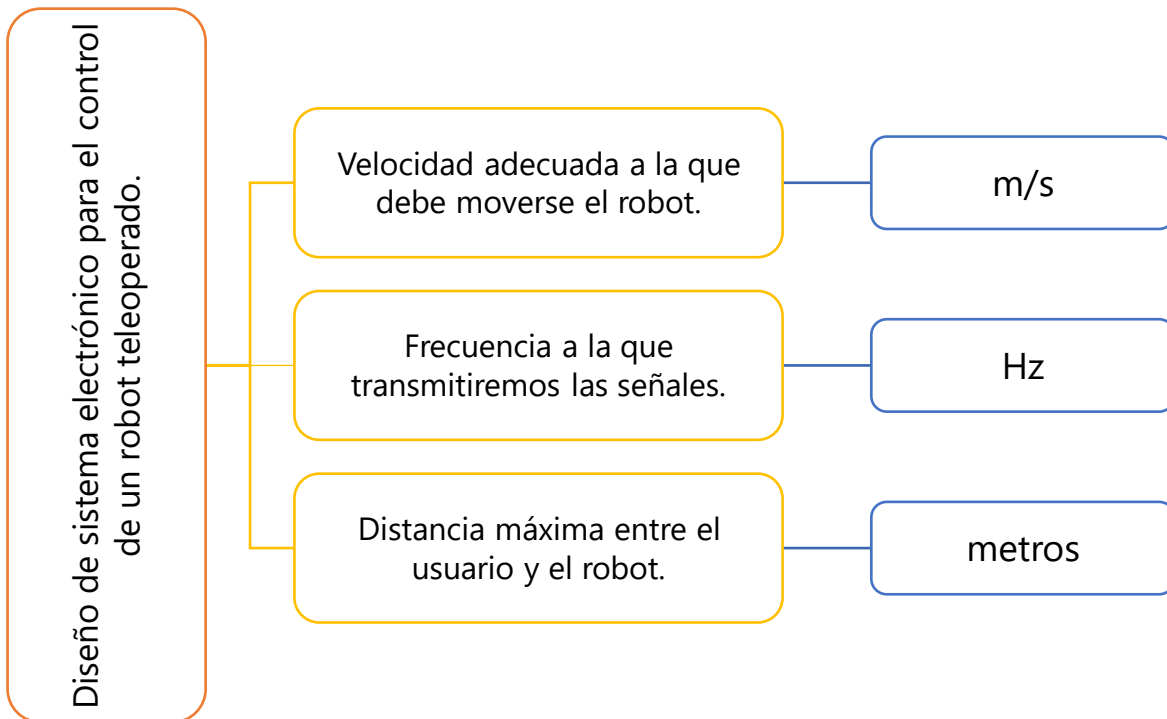
puntos clave del proyecto como ser, el problema que motiva la presente investigación, objetivo general, objetivos específicos, preguntas de investigación y finalmente se definen las variables independientes y la variable dependiente. Véase la tabla 3

Tabla 3- Variables de operacionalización

Sistema electrónico para el control de un robot teleoperado para la monitorización en las fincas de café					
Título	Objetivo General	Preguntas de Investigación	Objetivos Específicos	Variables Independientes	Variables Dependientes
¿Cuál es el sistema electrónico adecuado para el control de un robot que se desplaza por fincas de café?	Desarrollar el sistema electrónico para el control de los mecanismos de un robot desarrollado para la inspección de las fincas de café, mediante la comunicación por RF.	1) ¿el uso de la comunicación por RF en entornos abiertos es adecuado? 2) ¿ El Modelo de control PI es idóneo para el control de la velocidad de un robot que se desplaza en fincas de café? 3) ¿Cuál es el control adecuado del brazo robótico? 4) ¿Se lograrán superar los diferentes terrenos en las fincas de café con un sistema de cuatro ruedas?	1) Identificar si el uso de la comunicación por Rf en entornos abiertos es adecuado. 2) Determinar si el modelo de control PI es adecuado para el control de la velocidad de un robot que se desplaza en fincas de café. 3) Implementar el control adecuado del brazo robótico. 4) Realizar pruebas en terrenos de café para comprobar si el sistema de cuatro ruedas es adecuado para superar dichos terrenos.	Velocidad adecuada a la que debe moverse el robot. Frecuencia a la que transmitiremos las señales. Distancia máxima entre el usuario y el robot.	Diseño de sistema electrónico para el control de un robot teleoperado.

Fuente: propia (2020).

El diseño de un sistema electrónico para el control de un robot teleoperado dedicado a la monitorización de las fincas de café será la variable dependiente que se tendrá y las variables independientes son aquellas variables que afectan directamente el diseño de nuestro sistema electrónico, véase la ilustración 14.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 14- Diagrama de las variables de investigación

Se establecieron 4 variables independientes, con sus respectivas unidades para realizar el adecuado seguimiento de la variable dependiente.

4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Las técnicas e instrumentos utilizados en el desarrollo del proyecto tenían como objetivo obtener resultados precisos y adquirir datos indispensables para facilitar el desarrollo de un sistema de control óptimo.

La investigación fue un pilar decisivo en el desarrollo del presente proyecto, en lo que respecta a, se utilizaron recursos de fuentes confiables, tales como ser, libros, documentos de revistas, tesis universitarias, etc.

Por otra parte, para el desarrollo del sistema de control, fueron útiles diferentes programas, como ser, mikroC PRO for PIC, este fue esencial para el desarrollo del software del sistema.

4.4. MATERIALES

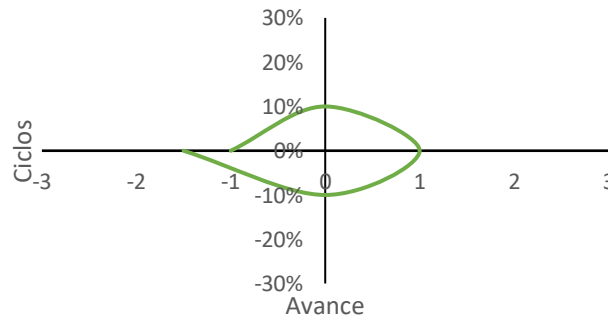
En lo que respecta a los materiales utilizados, fueron seleccionados con él objetivo de un correcto funcionamiento, con referencia a lo anterior se enlistan los principales materiales:

- Modulo RF: este es el encargado de percibir y enviar la información entre el usuario y el robot.
- Modulo Receptor: es el encargado de adaptar las señales para poder ser ingresadas al sistema.
- Microcontrolador PIC: considerado el más importante de todos, debido a que es el cerebro del sistema, este procesa la información enviada por el usuario y la convierte en acciones.

4.5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En la presente sección se remite a los métodos utilizados para el desarrollo del problema planteado anteriormente, especificando las actividades que se realizaron basándose en la metodología de espiral para la validación de nuestra hipótesis. Este modelo nos presenta cuatro pasos principales de los cuales surgen nuevas actividades, tan pronto culmina un paso del desarrollo, inicia otro. Hecha la observación anterior, se presentan los pasos que permitieron el desarrollo de la presente investigación:

4.5.1. CICLO 1 MÉTODO ESPIRAL



Fuente: propia (2020).

Ilustración 15- Primera espiral con la implementación de la RF

- Etapa I.I: determinar a fijar los objetivos para establecer comunicación mediante RF.

En esta etapa se planificaron los objetivos específicos del problema planteado, límites, presupuesto, cronograma y condiciones de entorno, para luego predecir la duración de cada actividad de manera individual. Para nuestra primera espiral se analizó la comunicación entre el usuario y el robot. Tomando en cuenta que debía ser estable, de largo alcance y bajo consumo de energía. Se determinó que debía ser concluida en 1 semana.

- Etapa II.I: análisis de riesgo que presenta el uso de la RF.

Se identificó que en la RF se pueden interceptar ruidos que afecten los datos que se reciben, para solucionar dicho problema se utiliza el microcontrolador para dar al robot solo las ordenes deseadas.

- Etapa III.I: desarrollar, verificar y validar la comunicación por RF.

En este tercer paso, después de haber analizado los riesgos, se da inicio al desarrollo de nuestro prototipo de control. Para la parte de evaluación se toman en cuenta los resultados obtenidos por el prototipo, para esto se planifican pruebas y luego se procede a la realización de estas. Las pruebas planificadas son el envío de datos entre los módulos de RF para luego visualizar los datos obtenidos para manipularlos a nuestro interés y lograr el control de los motores gracias a esto. Se enlistarán las pruebas planificadas a realizar:

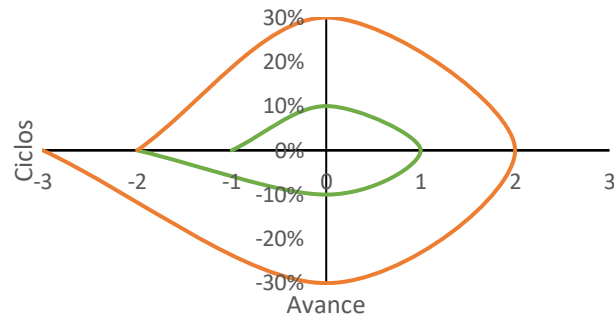
- 1) Enviar datos mediante RF al microcontrolador y mostrar dichos datos.
- 2) Activar led con los datos obtenidos en el microcontrolador.
- 3) Enviar señales de PWM dependiendo de los datos recibidos.
- 4) Realizar envío de datos variando las distancias, para reconocer la máxima distancia posible.

- Etapa IV.I: planificar el paso subsiguiente a la RF.

Para finalizar con la primera espiral, se evalúan los resultados obtenidos con nuestro prototipo y se comparan con los hitos fijados, para luego repetir o no el ciclo con el objetivo de corregir los errores identificados y así limitar los defectos del prototipo. Para la continuación de nuestra espiral

se debe evaluar la velocidad adecuada a la que se debe mover nuestro robot en los terrenos de las fincas de café.

4.5.2. CICLO 2 MÉTODO ESPIRAL



Fuente: propia (2020).

Ilustración 16- Segunda espiral con el control de la velocidad del robot

- Etapa I.II: determinar o fijar los objetivos para el control de la velocidad del robot.

Para el inicio de nuestra segunda espiral se determinó la necesidad de un método para controlar la potencia suministrada a los motores del robot, logrando manipular la velocidad del robot. Tomando en cuenta las irregularidades que presentan los terrenos de las fincas de café.

- Etapa II.II: análisis de riesgo al controlar la velocidad del robot.

Con el seguimiento de nuestra segunda espiral se presentó una problemática, para que el robot se desplace a una velocidad constante se debe implementar un modelo de control, debido a las inclinaciones que presentan las fincas de café. Se realizarán pruebas para establecer una solución adecuada al problema planteado.

- Etapa III.II: desarrollar, verificar y validar el control de la velocidad de los motores.

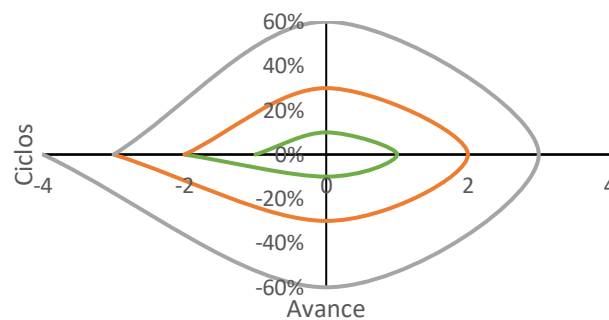
Se implementará un modelo de control para la velocidad de los motores, se realizarán las siguientes pruebas:

- 1) Desplazamiento del robot en pista con terrenos inclinados.
- 2) Movilizar el robot en terreno blando.
- 3) Manipular el robot en fincas de café.

- 4) Evaluar los resultados para verificar el modelo de control óptimo para el robot.
 - Etapa IV.II: planificar las acciones subsiguientes al control de la velocidad del robot.

Evaluar los resultados obtenidos por las pruebas en el control de la velocidad de nuestro robot, si los valores son negativos se procederá a imitar el presente ciclo utilizando métodos de control diferentes, en caso contrario se continuará con el tercer ciclo, en el cual se tratará la interfaz adecuada para el control del robot.

4.5.3. CICLO 3 MÉTODO ESPIRAL



Fuente: propia (2020).

Ilustración 17- Tercera espiral, control del brazo del robot

- Etapa I.III: determinar o fijar los objetivos para el control del brazo integrado en el robot.

Para la tercera espiral, se fijó, implementar el control adecuado del brazo robótico, el cual consta de dos grados de libertad manipulados por dos servomotores.

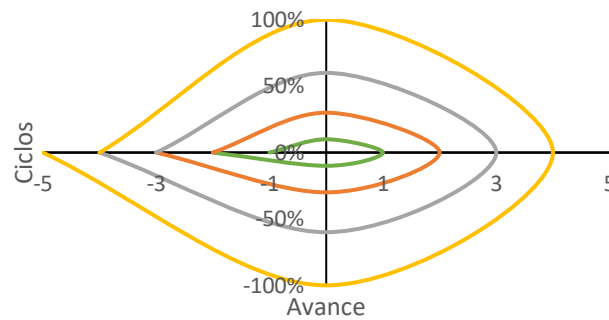
- Etapa II.III: análisis de riesgo del brazo robótico.
- El control de este brazo debe de ser rápido y estable en el momento que el usuario decida hacer uso de este mismo.
- Etapa III.III: desarrollo, verificar y validar la interfaz adecuada.

Se establecerá un interruptor que este dedicado meramente al movimiento de estos servomotores sin la necesidad de que el microcontrolador procese la información enviada por el usuario.

- 1) Realizar pruebas exhaustivas para comprobar su fluidez.
 - 2) Comprobar que sea amigable, mediante pruebas realizadas por diferentes usuarios.
- Etapa IV.III: planificar las acciones subsiguientes.

Al finalizar el tercer ciclo se analizarán los resultados obtenidos, dando así paso a un cuarto ciclo, donde se integrarán todos los componentes expuestos en los ciclos anteriores para formar nuestro sistema.

4.5.4. CICLO 4 MÉTODO ESPIRAL



Fuente: propia (2020).

Ilustración 18- Cuarta espiral, pruebas integrales y validación del funcionamiento del robot

- Etapa I.IV: determinar o fijar los objetivos.

El objetivo de nuestra cuarta espiral es la integración de nuestro sistema electrónico al robot para luego realizar pruebas y validar su correcto funcionamiento. Esto en el tiempo de 3 semanas.

- Etapa II.IV: análisis de riesgo.

Para nuestra cuarta espiral se espera que no tengamos riesgos, debido a que estos se han ido minorizando con el paso de los ciclos 1, 2 y 3. Sin embargo, se espera realizar las pruebas necesarias en el cabo de 1 semana para recopilar información sobre las pruebas realizadas y analizar estas en busca de defectos.

- Etapa III.IV: desarrollar, verificar y validar.

Se implementará el sistema electrónico de control al cuerpo del robot, luego se realizarán las pruebas descritas a continuación:

- 1) 20 pruebas en terrenos que simulan una finca de café.
- 2) 20 pruebas en terrenos reales de una finca de café.

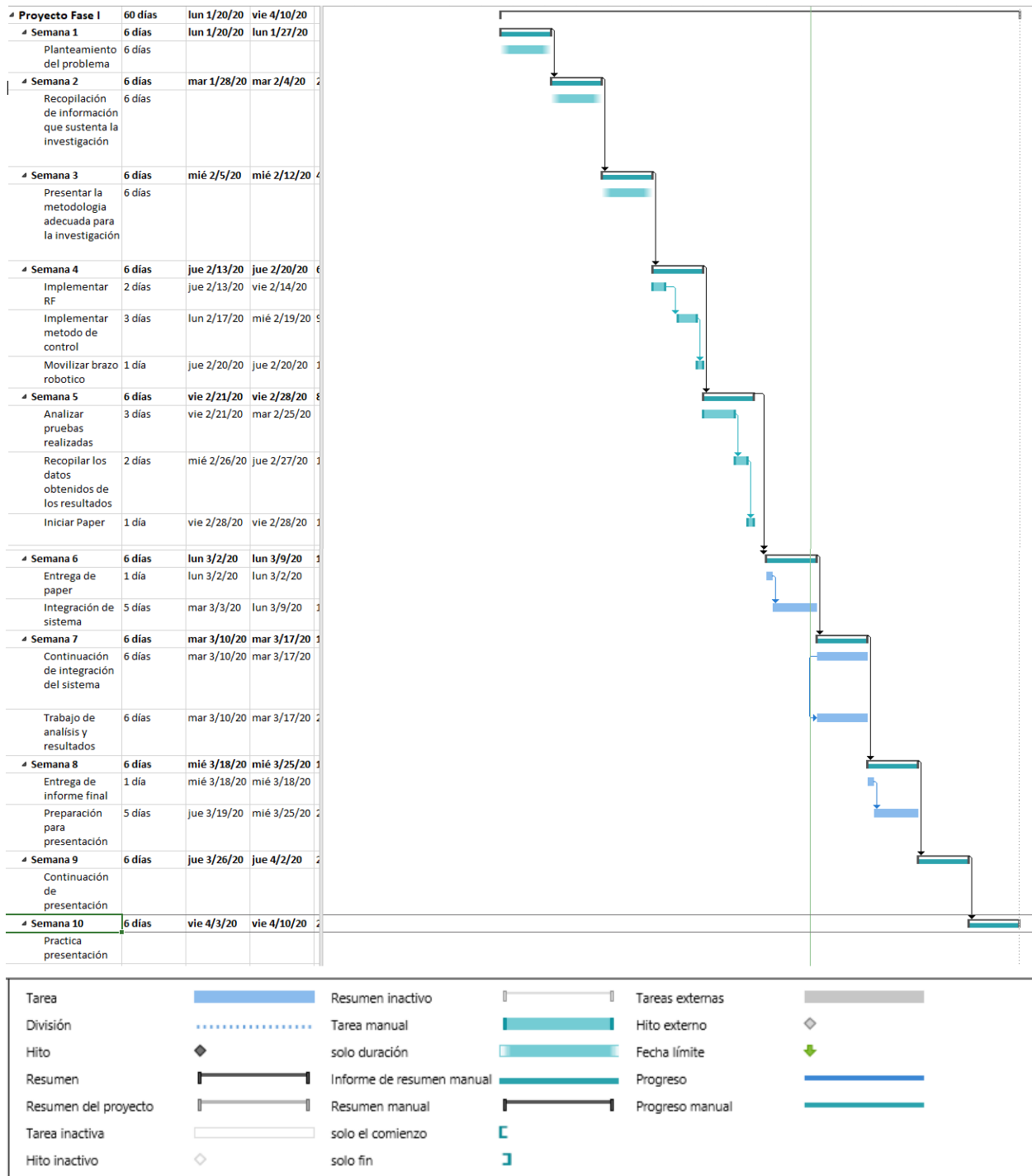
seguidamente se analizarán los resultados obtenidos para verificar los errores o defectos existentes, una vez corregidos estos se validará el funcionamiento del robot.

4.6. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Nuestra investigación no es validable hasta que se comprueba el buen funcionamiento de nuestro prototipo. Para esto se realizaron pruebas de nuestro robot en campo y durante cada ciclo de la metodología aplicada se comprobó el correcto funcionamiento de los componentes que forman nuestro sistema.

4.7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tomando en consideración un período académico que consta de 10 semanas, se realizó un cronograma de actividades de manera secuencial, véase la ilustración 15, iniciando con el planteamiento de nuestro problema a solucionar, seguido de la recopilación de la información que sustenta la investigación realizada para luego presentar la metodología adecuada a nuestra investigación. En la posteridad se inició con el desarrollo de nuestro sistema electrónico, al culminar este paso se analizaron los resultados obtenidos y para finalizar se realizaron recomendaciones de acuerdo con nuestras conclusiones para tener culminado nuestro proyecto en la semana 7 y preparar nuestra presentación final



Fuente: propia (2020).

Ilustración 19- Cronograma de actividades

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se reflexionará sobre los aportes generados por las teorías de sustento expuestas en el marco teórico del presente informe, por otra parte, se ostentarán las pruebas realizadas durante las diferentes espirales de la metodología que se implementó, para luego comparar la teoría propuesta con los resultados obtenidos. Para iniciar nuestra investigación se presentó la necesidad de comprender el concepto de teleoperación.

5.1. ANÁLISIS DE TEORÍAS DE SUSTENTO

La teleoperación no es más que la manipulación de diferentes mecanismos a distancia, dando así, ventajas al hombre en el manejo de tareas que representan una amenaza a nuestra integridad física. Esta consta de 5 elementos principales los cuales son: el operador, dispositivo a controlar, interfaz, control y canales de comunicación y los sensores. La presente investigación se centró en el control, los canales de comunicación y la interfaz para poder operar los mecanismos de un robot dedicado a la monitorización de las fincas de café. Para hacer posible lo anterior expuesto se analizaron los diferentes dispositivos de control existentes, los comandos de alto nivel y los de bajo nivel, a diferencia de los comandos de bajo nivel, los de alto nivel generan ordenes más complejas que el robot es capaz de realizar autónomamente, concluyendo de esta manera que los comandos de alto nivel resultan adecuados para nuestro prototipo, ya que estos no controlan en todo momento las articulaciones del robot, cabe destacar, que este método de control es muy utilizado en los sistemas desarrollados para misiones espaciales.

La comunicación entre el usuario y la maquina es de vital importancia para el control de los sistemas del robot, tomando en cuenta las extensiones territoriales de las fincas de café, se decidió hacer uso de la RF como método de comunicación, debido a su bajo costo, fácil implementación debido a los diferentes métodos que existen para establecer esta sin necesidad de licenciamiento y a que esta es de libre acceso. Al seleccionar este método de comunicación se consideraron los aspectos que afectarían nuestra investigación, como ser el método de transmisión a utilizar y el método de control.

Se identificaron 3 maneras de transmitir información mediante RF (véase ilustraciones, 6, 7, 8) y de estas se utilizó la transmisión simple, debido a la limitación que tiene el módulo de transmisión utilizado, este solo puede trabajar como transmisor, y no como receptor, cabe destacar que para el control de los motores de nuestro robot se utilizó un microcontrolador como intermediario entre el receptor y los motores, este nos facilita la comunicación con los motores y de esta manera enviar ordenes al robot, para mantener una velocidad constante sin importar las inclinaciones que presente el terreno se desarrolló un PI, este integra las partes proporcional e integral de un método de control y facilita al usuario el control del robot en terrenos accidentados gracias a la retroalimentación de la velocidad a la que el robot se desplaza. como el cerebro de dicho robot se utilizó un microcontrolador, dando así el total control de la potencia entregada a los motores, expuesto lo anterior, se estudiaron los microcontroladores PIC, llegando a la conclusión de utilizar el P18 por sus altas especificaciones, siendo considerado un microcontrolador de gama alta gracias al tamaño de sus instrucciones, llegando hasta 16 bits y trabajando con tensiones bajas.

5.2. PRUEBAS

Tabla 4- Formato de descripción de pruebas.

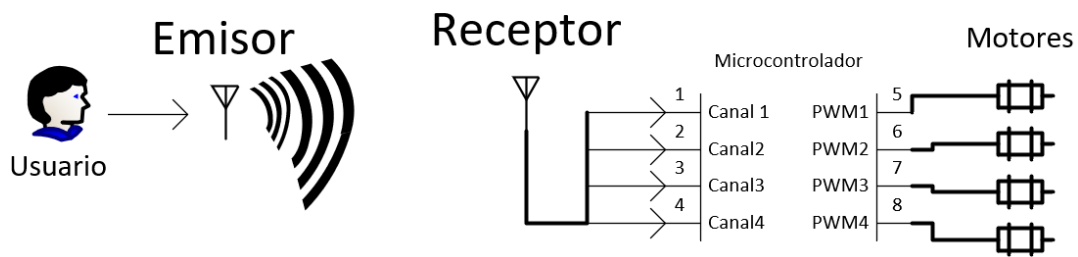
Título	
Objetivos	
Análisis de riesgos	
Desarrollar, verificar y validar	
Resultados	
Planificación	

Fuente: propia (2020).

- Título: nombre que recibe el ciclo.
- Objetivos: los objetivos deseados a alcanzar y las condiciones que deben cumplirse.
- Análisis de riesgos: eliminación de los aspectos que no concuerdan con las condiciones.
- Desarrollar, verificar y validar: se desarrolla un prototipo de prueba para luego verificar el funcionamiento de este.

- Resultados: resultados obtenidos al realizar una determinada operación.
- Planificación: este es el último paso del ciclo y es donde se decide si continuar con una nueva espiral o repetir una interior debido a errores.

Para el cumplimiento de la metodología se realizaron prototipos para luego proceder al desarrollo de pruebas e ir integrando las diferentes partes del sistema. Se documentaron las pruebas realizadas en cada espiral utilizando la tabla 4, esta describe las partes de cada paso. En dicha tabla se describen las diferentes etapas de una espiral, los objetivos, el análisis de riesgos, desarrollar, verificar, validar y la planificación del siguiente paso.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 20- Diagrama de funcionamiento del sistema

La ilustración 20 representa de manera gráfica el sistema electrónico para el control del robot, este consta de cuatro pasos fundamentales: el usuario envía las órdenes a ejecutar, el receptor modula las señales para ser ingresadas al microcontrolador mediante PWM, el microcontrolador procesa y mapea dichas señales y por último este interpreta las órdenes del usuario y las ejecuta. Este diagrama implementa las diferentes áreas de un ingeniero en Mecatrónica, como ser: la electrónica, la comunicación, desarrollo de software y el control. (Kyura & Oho, 1996)

Para iniciar la investigación se fijaron los objetivos específicos, estos se cumplieron de manera individual en cada ciclo de la espiral. Como primer ciclo se estableció comunicación mediante RF. En la tabla 5 se enlistan las pruebas realizadas, seguidas por los resultados obtenidos.

5.2.1. CICLO 1 MÉTODO ESPIRAL

Tabla 5- Desarrollo de ciclo 1 método espiral

IMPLEMENTACIÓN DE LA RF	
Objetivos	Establecer comunicación entre el usuario y el robot. Tomando en cuenta que debía ser estable, de largo alcance y bajo consumo de energía. Se determinó que debía ser concluida en 1 semana.
Análisis de riesgos	Se identificó que en la RF se pueden interceptar ruidos que afecten los datos que se reciben, para solucionar dicho problema se utiliza el microcontrolador, este procesa los datos del receptor para luego accionar los motores del robot.
Desarrollar, verificar y validar	<ol style="list-style-type: none"> 1. Enviar datos mediante RF al microcontrolador y mostrar dichos datos. 2. Activar led con los datos obtenidos en el microcontrolador. 3. Enviar señales de PWM dependiendo de los datos recibidos. 4. Realizar envío de datos variando las distancias, para reconocer la máxima distancia posible.
Resultados	Se hicieron pruebas de los módulos RF 4 CLICK para establecer comunicación entre dos PIC, se descartó el uso de dichos módulos debido a la falta de puertos Mikro Bus (protocolo de comunicación desarrollado por Mikrochip) en los PIC convencionales. En su lugar, se implementó la comunicación por RF haciendo uso del radiocontrol TGY-I6 con su respectivo receptor TGY-IA6B, estos trabajan a una frecuencia de 2.4GHz. Las señales que envía el receptor a nuestro microcontrolador

son de tipo PWM, para poder leer dichas señales fue necesario el uso de interrupciones situadas en el puerto B del microcontrolador, ya que este no cuenta con un puerto que sea capaz de interpretar señales PWM. Una vez desarrollado el programa para leer las señales del receptor se procedió a mostrar la información recibida, en el computador haciendo uso del puerto UART del microcontrolador, se lograron percibir datos con un error de ± 30 , dichos datos dan falsos positivos y negativos, para solucionar dicho error se implementó un delay de 0.1 segundo minorizando de esta manera el error a ± 2 , al culminar las pruebas de los datos recibidos se procedió al accionamiento de leds dependiendo de los movimientos realizados en el control, al realizar las pruebas se encontró un problema, el microcontrolador accionaba los puertos incorrectos cuando se realizaban cambios bruscos, con ayuda del manual del microcontrolador se dio a conocer que la forma correcta en la que se declara el accionamiento del puerto, inicialmente se utilizaban los registros PORTx para declarar la escritura de un puerto, siendo esta la manera errónea de declarar la escritura de un puerto, el registro correcto a utilizar es LATx ya que este es el que corresponde a la escritura de los puertos a diferencia de PORTx que corresponde a la lectura de estos.

Sustituyendo los comandos se logró un correcto accionamiento de los leds, para continuar con las pruebas de la comunicación por RF se utilizaron los puertos RC1 y RC2 para enviar señales PWM y controlar la velocidad de motores DC dependiendo de los datos recibidos por el microcontrolador, se logró un

correcto funcionamiento de los motores, respondiendo positivamente a las órdenes del usuario, para finalizar con las pruebas de RF se midieron diferentes distancias entre el emisor y el receptor para conocer la máxima distancia en la que este funciona sin problema alguno, recopilando los siguientes datos:

Distancia máxima en zona residencial = 400 m

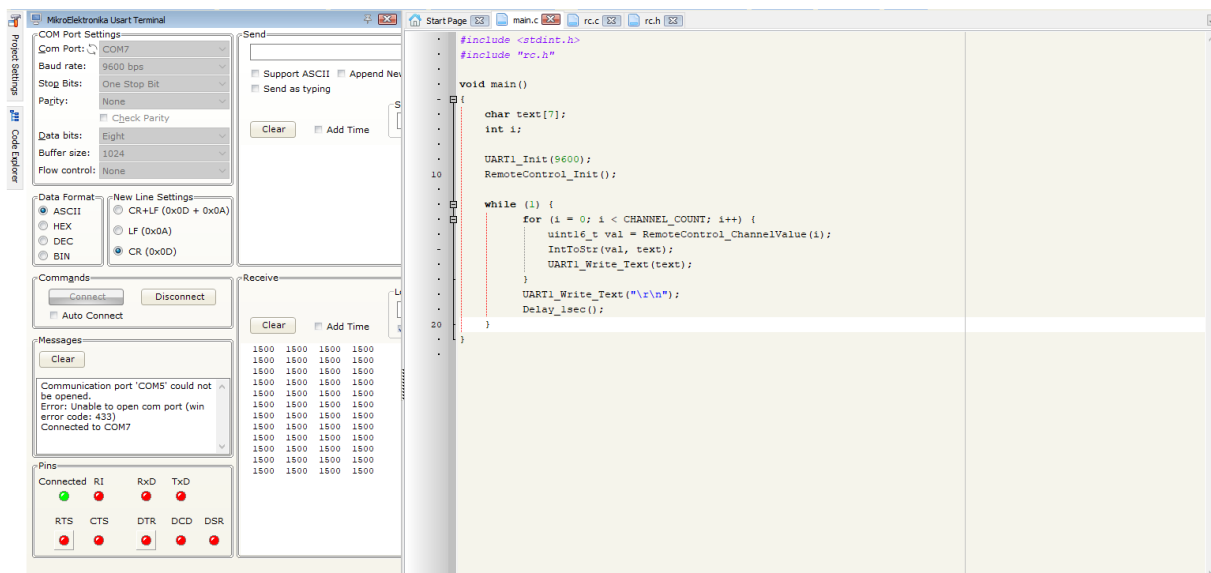
Distancia máxima en zona boscosa = 450 m

Distancia máxima en calle libre = 460 m

Planificación

Se cumplieron los hitos fijados al inicio de nuestro primer ciclo, resolviendo los problemas encontrados en el proceso se da paso a nuestro segundo ciclo donde se realizarán pruebas con el robot en campo para determinar la velocidad adecuada a la que este debe movilizarse.

Fuente: propia (2020).



Fuente: propia (2020).

Ilustración 21- Lectura de señales PWM

Para la implementación de la RF como método de comunicación se hizo uso del control TGY-i6 como emisor y su respectivo modulo TGY-iA6B como receptor, el receptor cuenta con una salida de 6 canales, los cuales modulan la señal recibida en PWM, dicha señal es enviada al microcontrolador PIC18F45K22 para luego ser decodificada pulso por pulso para interpretar las señales que envía el usuario y culminando así nuestra primera prueba. Cabe destacar que se hizo el cálculo para conocer la longitud de onda a la que trabaja la señal de RF.

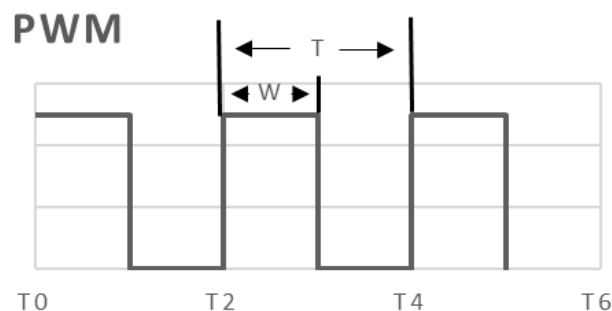
$$T = \frac{1}{2.4 \text{ GHz}} = 4.166 * 10^{-10} \text{ s}$$

Ecuación 5- Periodo de la onda

$$\lambda = C * T = 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4.166 * 10^{-10} \text{ s} = 12.498 \text{ cm}$$

Ecuación 6- Longitud de onda

Siendo C la velocidad de la luz, T el periodo de la onda y f la frecuencia a la que esta se propaga. En el proyecto realizado por (Janabi-Sharifi & Iraj, 2011) se considera la utilización de reflexión de fuerzas basadas en la impedancia remota. Para continuar se realizaron acciones simples con las señales recibidas, como ser el parpadeo de leds dependiendo de la posición de los joysticks en el control, en dicha prueba se presentó un problema, y es que la señal tenía ruido y este variaba los datos recibidos, creando falsos positivos, para solucionar dicho problema se retrasó la lectura del receptor en 0.1 segundo, disminuyendo de esta manera el error a $\frac{+}{-}1$.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 22- Ancho de pulso de una señal PWM

Para lograr la lectura de las señales PWM enviadas por el receptor al microcontrolador (véase ilustración 20; programa ejemplo), se debe utilizar una interrupción externa situada en los puertos B del microcontrolador, en este caso el PIC18F45K22, luego se guarda el tiempo que tarda el cambio de un flanco de bajada a uno de subida, para esto, cada vez que se recibe un pulso en cualquiera de los puertos RB4-RB7 del microcontrolador se guarda el primer tiempo (T1) en el timer interno de este y al cambiar el estado del pulso se guarda el segundo tiempo (T2), luego se hace la resta de estos tiempos para conocer el ancho de pulso (W) que estamos recibiendo y poder utilizar dicho dato a nuestra conveniencia.

Se logro el control deseado de las señales, por otra parte, se inició con el control de la velocidad de motores mediante el microcontrolador, dependiendo de las señales recibidas, los motores realizaron las acciones esperadas, girando en la dirección que se les accionaba y a la velocidad establecida. Culminando nuestro primer ciclo se evaluaron los resultados obtenidos, determinando que estos eran los esperados, dando así paso a nuestra segunda espiral, donde se analizara el control de la velocidad adecuado para el manejo del robot. Para dar continuación a la espiral se fijaron los objetivos del segundo ciclo, siendo el control de la velocidad del robot, se desarrolló un PID para la retroalimentación de la velocidad del robot.

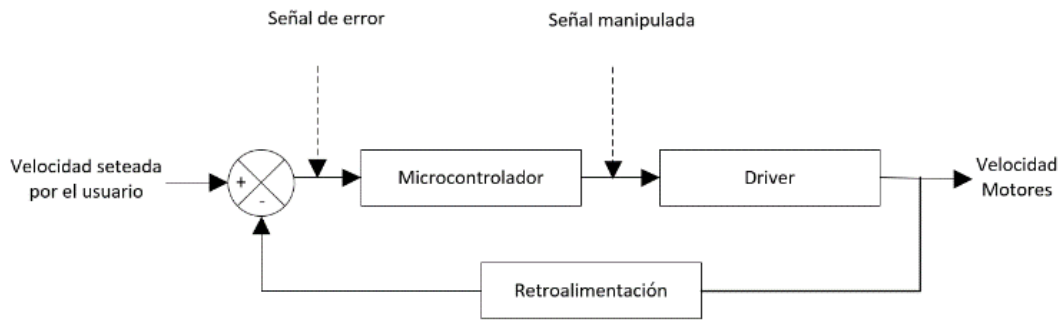
5.2.2. CICLO 2 MÉTODO ESPIRAL

Tabla 6- Desarrollo de ciclo 2 método espiral

CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL ROBOT	
Objetivos	Desarrollar un método para controlar la potencia suministrada a los motores del robot, logrando manipular la velocidad de este. Tomando en cuenta las irregularidades que presentan los terrenos de en la agricultura.
Análisis de riesgos	Con el seguimiento de nuestra segunda espiral se presentó una problemática, para que el robot se desplace a una velocidad constante se debe implementar un modelo de control, debido

a las inclinaciones que presentan los terrenos en la agricultura. Se realizarán pruebas para establecer una solución adecuada al problema planteado.

Desarrollar, verificar y validar	<ol style="list-style-type: none">1. Desplazamiento del robot en pista con terrenos inclinados.2. Movilizar el robot en terreno blando.3. Manipular el robot en fincas de café.4. Evaluar los resultados para verificar el modelo de control óptimo para el robot.
Resultados	<p>Se desplazo el robot en una pista con terrenos inclinados, la velocidad de este disminuyo considerablemente, para solucionar dicho problema se planteó el desarrollo de un PI mediante software, debido a que este utiliza un timer para la lectura del encoder de los motores, se hizo uso de un segundo PIC dedicado al control de la velocidad del robot. Para proseguir con las pruebas se movilizó el robot en terrenos blandos, cuando este perdía tracción en una de las ruedas consumía energía innecesaria, debido a esto se implementó un selector de modo, en el cual se puede elegir entre modo automático o control de rueda por rueda. Luego se manipulo el robot en fincas de café para validar el PI, este funciono correctamente, logrando mantener la velocidad deseada incluso en terrenos inclinados.</p>
Planificación	<p>Se cumplieron los hitos fijados al inicio de nuestro segundo ciclo, resolviendo los problemas encontrados en el proceso se da paso al tercer ciclo donde se desea implementar el control del brazo situado en la parte superior del robot.</p>



Fuente: propia (2020).

Ilustración 23- Diagrama de bloques del PI

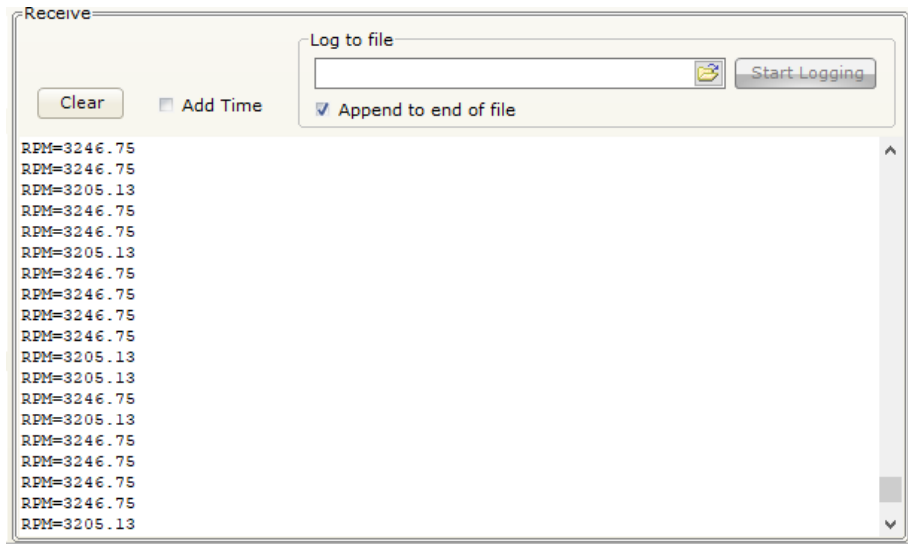
Se desarrollo un PI para el control de la velocidad cuando el robot se encuentra en modo automático, su función es retroalimentar la velocidad a la que se desplaza el robot, dando así una velocidad constante sin importar la inclinación del terreno, para complementar dicho método de control se establece un set point que funciona como un cruise control, donde la velocidad es seteada por el usuario con la ayuda del canal 2, dicha velocidad tiene un límite lineal de 1.21m/s, depende del diámetro que se utilice en las ruedas y de las revoluciones por minuto de nuestros motores. Cuando el usuario define la velocidad el robot avanza de manera autónoma a una velocidad constante, dando facilidad de manejo en terrenos inclinados.

$$N = N_0 \left(1 - \frac{I_n}{I_s}\right) = 122rpm \left(1 - \frac{350mA}{7A}\right) = 115.9rpm$$

Ecuación 7- Revoluciones a la salida de la caja reductora

$$Vel_{max} = 2\pi rN = 2\pi * 0.1 m * 115.9 rpm = 1.21 m/s$$

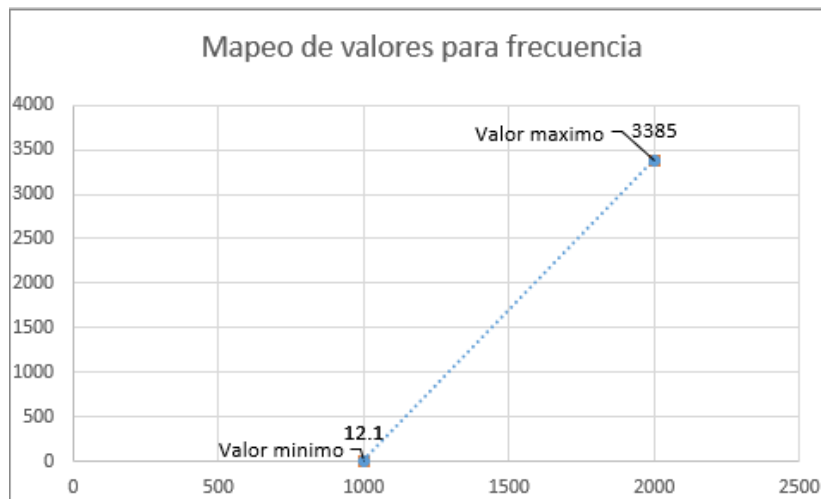
Ecuación 8- Velocidad máxima a la que se desplaza el robot



Fuente: propia (2020).

Ilustración 24- Lectura de frecuencia de motores

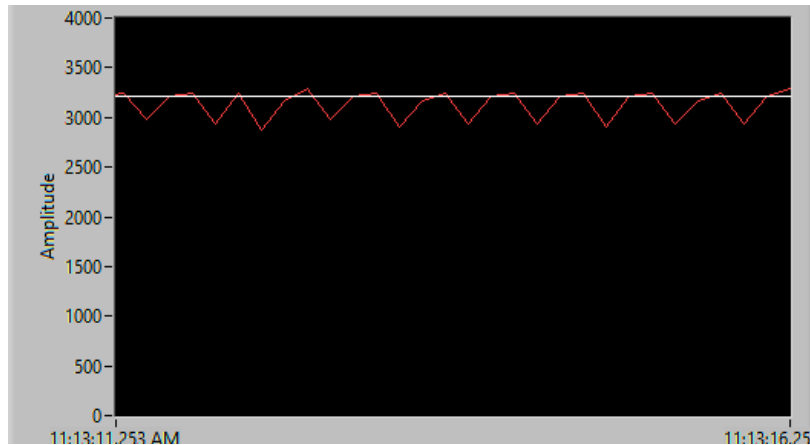
Para el desarrollo del PI se tomó en cuenta la frecuencia del encoder del motor (véase ilustración 24), siendo de 3246 Hz la máxima de los utilizados en el presente proyecto, luego se mapeo el set point a los valores mínimos y máximos de la frecuencia. Para conocer la ecuación que mapea los valores seteado a los valores de la frecuencia de los motores se utilizó una gráfica lineal de Excel, en esta se introducen el rango de valores que tiene el set point recibido y el rango de la frecuencia a la que trabajan los motores.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 25- Grafico de mapeo

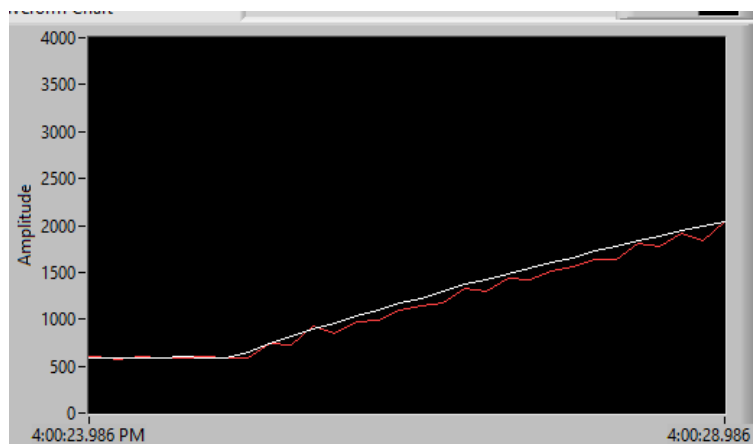
Se analizaron diferentes formatos de PID, las primeras pruebas se realizaron con un PID denominado ON/OFF (véase ilustración 26; grafica del PID ON/OFF), donde se activan los motores cuando estos se encuentran a una frecuencia menor a la seteada y se desactivan cuando sobrepasan el límite seteado.



Fuente: propia (2020).

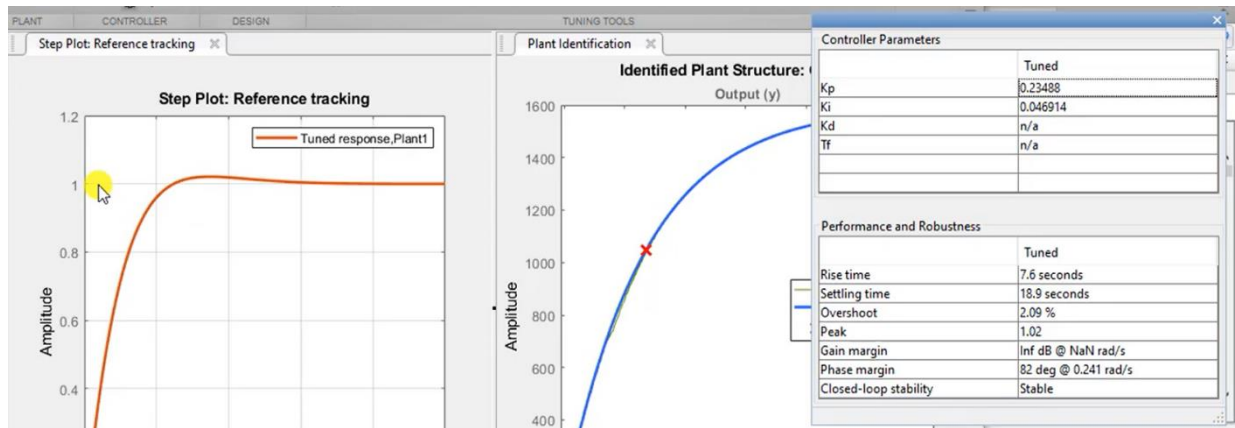
Ilustración 26- Grafica del PID ON/OFF

Se identificó que este formato es muy inestable, dando un exceso de variación con respecto a la frecuencia seteada, se procedió al desarrollo de un PI auténtico, donde el microcontrolador es retroalimentado con la frecuencia de los motores y luego se calcula el error y se manipula la potencia entregada a los motores para que estos giren a la frecuencia deseada. Se calcularon los valores del PI mediante Matlab (véase ilustración 28).



Fuente: propia (2020).

Ilustración 27- Grafica del PI auténtico



Fuente: propia (2020).

Ilustración 28- Valores de PI en Matlab

Los valores de K_P y K_I del PI se calcularon haciendo uso de Matlab, para esto, primero se deben guardar los datos obtenidos por el frecuencímetro, luego estos se incluyen en un cuadro de texto en Matlab y haciendo uso de la aplicación "PID Tuner" se generan los valores recomendados para el PI, luego se modifica la linealidad que tendrá el método de control y se obtuvieron los valores exactos para el PI.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 29- Pruebas del PI en terrenos inclinados

Para validar el funcionamiento del PI se realizaron pruebas en campo (véase ilustración 29), logrando superar los terrenos sin problemas gracias a sus motores de poca velocidad, pero alto torque. Por otra parte, se implementó un modo de control de llanta por llanta, donde se es capaz de manipular cada rueda de manera individual a la velocidad deseada, en caso de encontrarse con obstáculos.

El modo de rueda por rueda es activado dando un pulso alto en el canal 5 del receptor, para continuar se realizaron pruebas del robot en fincas de café, estas pruebas no fueron exhaustivas, pero se logró superar los terrenos sin problema gracias a su tracción 4x4 en modo automático, no fue necesario el uso del modo manual donde se controlan las llantas de manera individual. A diferencia del robot desarrollado por (Gerardino, Muñoz, & Orduña, 2014) que no integra un control de manera individual de las ruedas debido al sistema de oruga utilizado. Se evaluaron los resultados obtenidos por las pruebas realizadas, estas fueron de total éxito, procediendo con nuestra espiral se dio paso a un tercer ciclo, en el cual se implementó el control del brazo situado en la parte superior del robot.

5.2.3. CICLO 3 MÉTODO ESPIRAL

Tabla 7- Desarrollo de ciclo 3 método espiral

CONTROL DEL BRAZO	
Objetivos	Para el tercer ciclo, se fijó implementar el control adecuado del brazo robótico, el cual consta de dos grados de libertad manipulados por dos servomotores.
Análisis de riesgos	El control de este brazo debe de ser rápido y estable en el momento que el usuario decida hacer uso de este mismo.
Desarrollar, verificar y validar	Se estableció un interruptor que este dedicado meramente al movimiento de estos servomotores sin la necesidad de que el microcontrolador procese la información enviada por el usuario. 1. Realizar pruebas exhaustivas para comprobar su fluidez.

	<p>2. Comprobar que sea amigable, mediante pruebas realizadas por diferentes usuarios.</p>
<p>Resultados</p>	<p>Para el tercer ciclo se fijó el control del brazo situado en la parte superior del robot, este consta de dos grados de libertad, manipulados por dos servomotores y un sistema de engranajes, para que el control de estos sea fluido se utilizaron los canales 4 y 6 del receptor para controlarlos mediante interruptores situados en el control, logrando así un control directo y eficaz, temiendo que se necesitara mucha experiencia para el control de dichos accionamientos, se realizaron pruebas por diferentes usuarios, estos solo necesitaron una breve explicación para localizar los interruptores que accionaban los movimientos de los servomotores. Al culminar las pruebas de nuestro tercer ciclo se dio paso al cuarto ciclo, donde se integraron todas las partes anteriores para realizar pruebas exhaustivas de nuestro sistema y poder validar su correcto funcionamiento.</p>
<p>Planificación</p>	<p>Al culminar las pruebas realizadas al brazo, se planifico la integración de las diferentes partes del sistema. Para esto se diseñó una tarjeta que contiene todas las partes necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.</p>

Fuente: propia (2020).

Se integro el control del brazo robótico, este consta de dos grados que son controlados por dos servomotores, inicialmente se realizaron pruebas haciendo uso del microcontrolador como intermediario, se logró percibir un tiempo de retardo entre 2s a 3s, como solución se planteó controlar los servomotores directamente desde el receptor de RF, esto logro un control fluido y eficaz hacia los servomotores, luego se procedió a la realización de pruebas por diferentes usuarios para comprobar que el control de dicho brazo fuese amigable. Luego se procedió a la

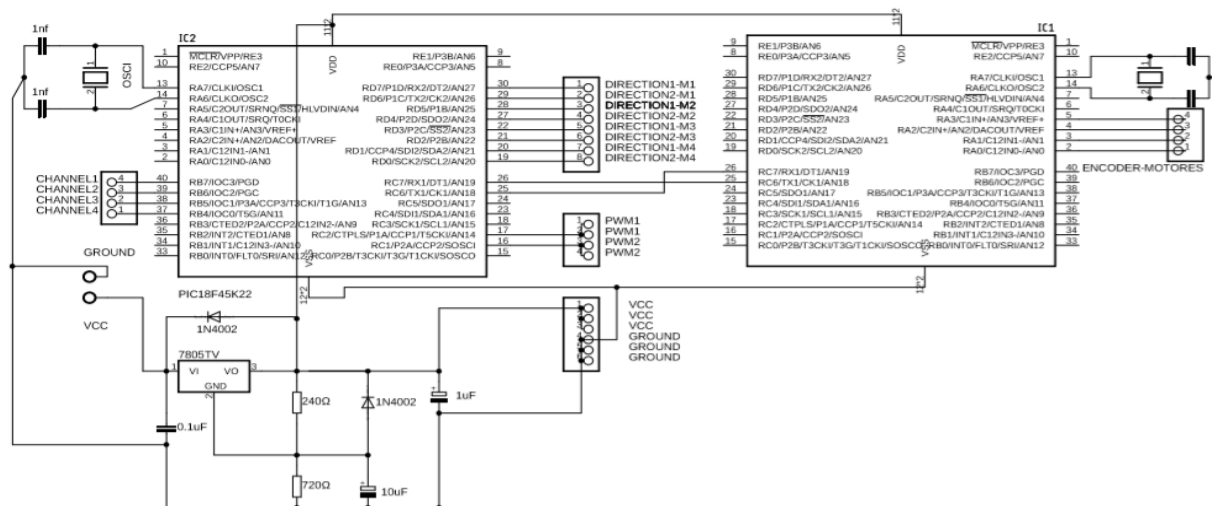
planeación del ultimo espiral, este consta de la integración de los diferentes componentes del sistema, inicialmente se desarrolló una tarjeta que cuenta con las salidas y entradas necesarias.

5.2.4. CICLO 4 MÉTODO ESPIRAL

Tabla 8- Desarrollo de ciclo 4 método espiral

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	
Objetivos	El objetivo de la cuarta espiral es la integración del sistema electrónico al robot para luego realizar pruebas y validar su correcto funcionamiento. Esto en el tiempo de 3 semanas.
Análisis de riesgos	Para la cuarta espiral se espera que no existan riesgos, debido a que estos se han ido minorizando con el paso de los ciclos 1, 2 y 3. Sin embargo, se espera realizar las pruebas necesarias en el cabo de 1 semana para recopilar información sobre estas y realizar un análisis en busca de defectos.
Desarrollar, verificar y validar	Se implementará el sistema electrónico de control al cuerpo del robot, luego se realizarán las pruebas descritas a continuación: <ol style="list-style-type: none"> 1. 20 pruebas en terrenos que simulan una finca de café. 2. 20 pruebas en terrenos reales de una finca de café. seguidamente se analizarán los resultados obtenidos para verificar los errores o defectos existentes, una vez corregidos estos se validará el funcionamiento del robot.
Resultados	Se logro completar las pruebas fijadas para la verificación del prototipo, gracias al correcto desarrollo de la metodología, se superaron los errores encontrados en el camino y estos no se presentaron en el prototipo final. Culminando las 40 pruebas fijadas sin ningún inconveniente, se validó el correcto funcionamiento del robot.

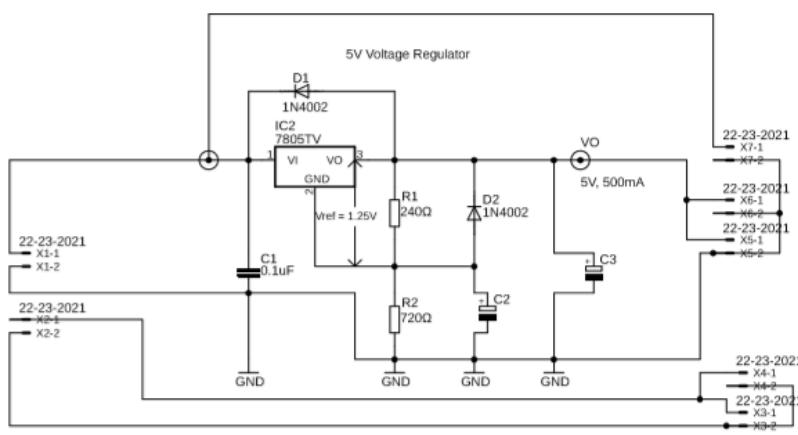
Fuente: propia (2020).



Fuente: propia (2020).

Ilustración 30- Esquemático de tarjeta

Para iniciar el cuarto y último ciclo se hizo el diseño de una tarjeta que cuenta con las salidas y entradas necesarias para el prototipo, esta se desarrolló en el programa de CAD Eagle. Esta consta con los espacios para dos PIC de 40 pines, dejando disponibles las salidas de los puertos RDO-RD7 para las direcciones y los puertos RC1-RC2 para la potencia de los motores, las entradas de los puertos RB4-RB7 para las señales provenientes del receptor, entrada en el puerto RB0 para el encoder de los motores y conectados los dos microcontroladores por sus puertos RC6 y RC7 para la comunicación UART. Cabe destacar que los osciladores implementados a la tarjeta trabajan a una frecuencia de 8MHz



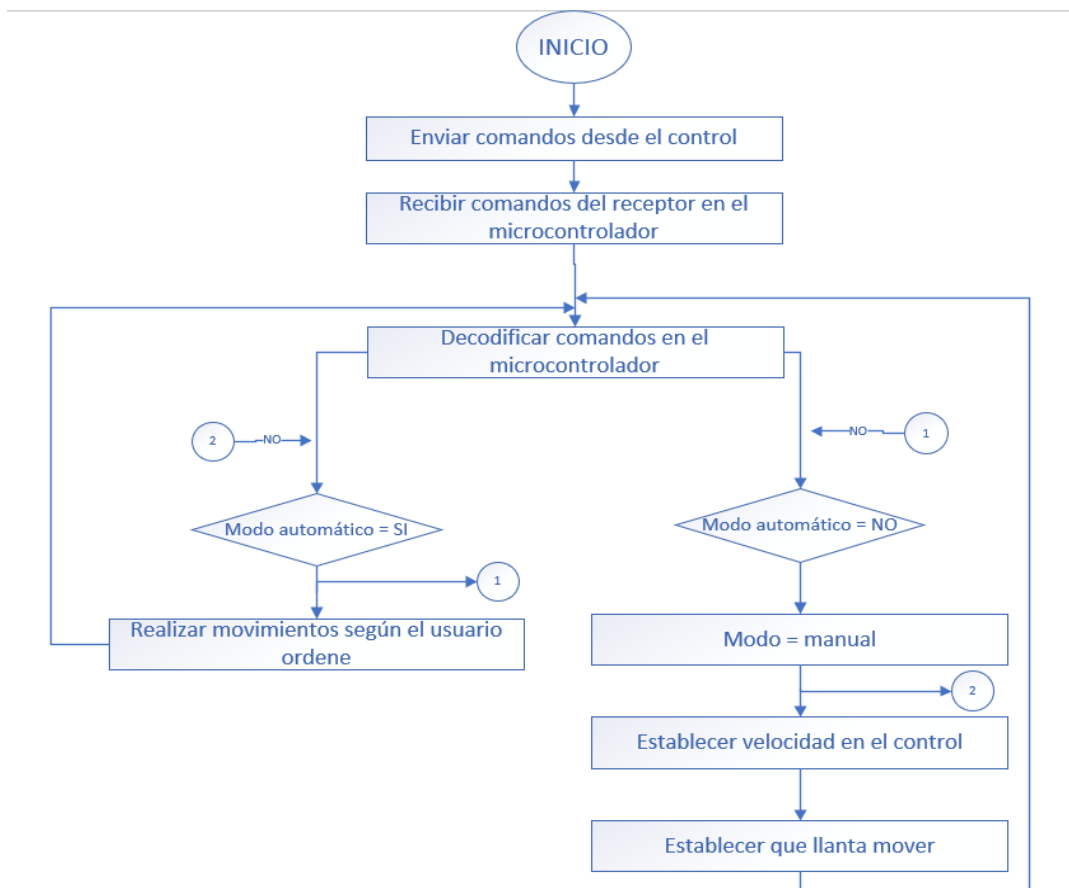
Fuente: propia (2020).

Ilustración 31- Esquemático de tarjeta de poder

Por otra parte, Se implemento un regulador de voltaje en la tarjeta para proteger está en caso de sobrecarga, este consta de:

- 2 capacitores electrolíticos de 10uF y 1uF.
- 2 resistencias de 720 y 240 ohmios.
- 2 diodos 1N4002.
- 1 capacitor cerámico de 0.1uF.

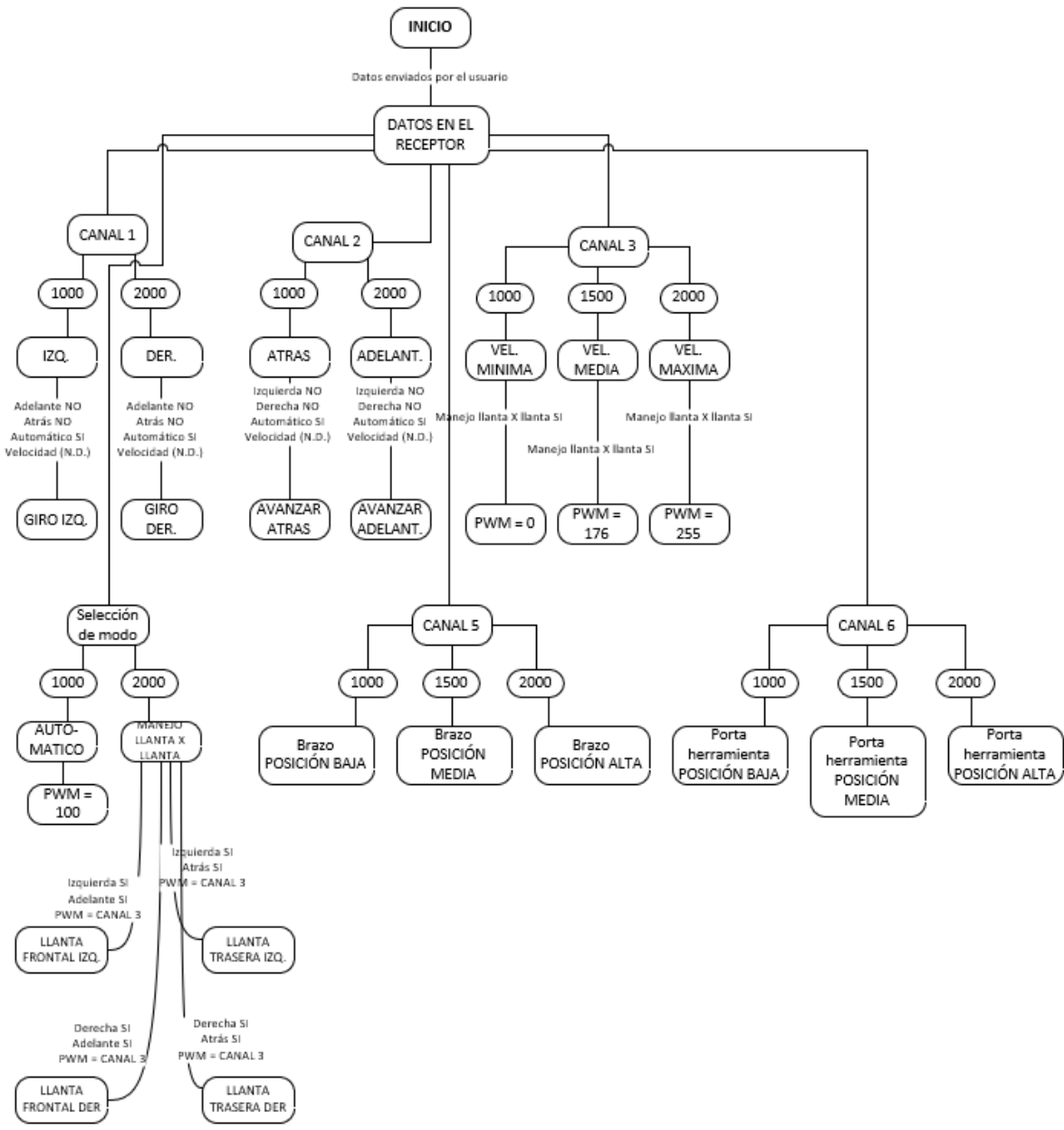
El capacitor electrolítico de 1uF ayuda en el rechazo de ondas mayores a 15dB, mientras que el de 10uF ayuda a improvisar una respuesta transitoria en la salida del circuito. Por otra parte, los diodos protegen en caso de un cortocircuito en la entrada y en la salida por la carga de los capacitores.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 32- Algoritmo de funcionamiento general

Se realizaron pruebas sencillas como el encender leds mediante el envío de datos del control a esta tarjeta para validar su funcionamiento y luego integrarla al sistema de control, para proceder se realizó el diseño de un compartimento que se situó en la parte inferior del robot. Por otra parte, se desarrolló una tarjeta de poder que alimenta los diferentes componentes del sistema, luego se procedió a la impresión de dichas tarjetas para luego soldar los componentes electrónicos.



Fuente: propia (2020).

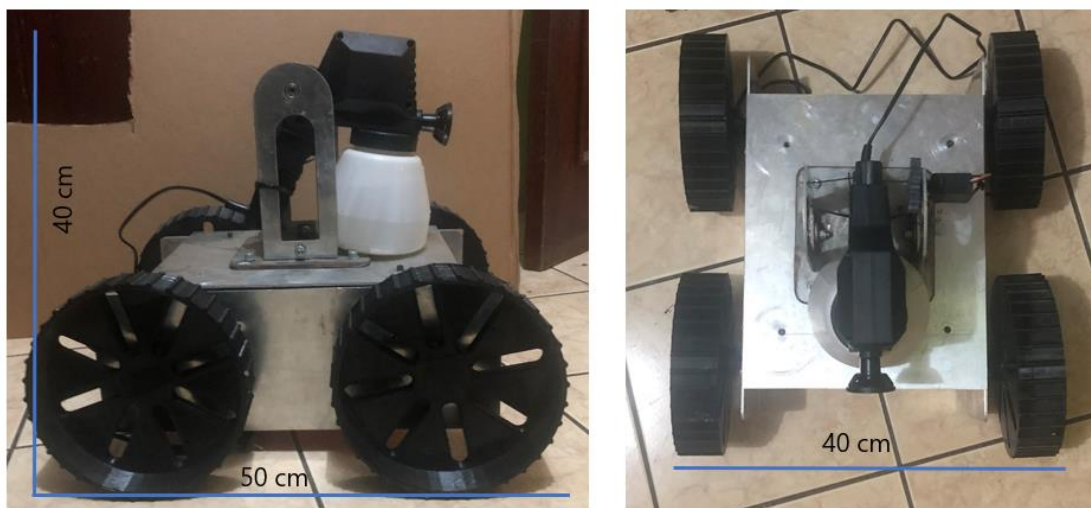
Ilustración 33- Algoritmo de funcionamiento específico

La tarjeta de poder consta de dos entradas de alimentación, un circuito que regula el voltaje a 5v y este es entregado a los servomotores situados en el brazo del robot, a este se le pueden suministrar de 9-40 voltios.

En la ilustración 32 se puede apreciar el funcionamiento general del sistema, donde sobresalen las condiciones que se deben cumplir para la selección de modo del robot. Cada modo conlleva su complejidad, el modo automático debido al PID desarrollado y posteriormente implementado y el modo manual, debido a la programación que requiere para realizar debidas condiciones.

Se utilizo un método de control de comandos de alto nivel, donde el robot recibe una orden y la ejecuta de manera autónoma hasta que el usuario ordene lo contrario, como es el ejemplo del robot teleoperado en dos puntos diferentes de la tierra por medio de wifi realizado por Penizzotto. (Penizzotto, Slawiński, & Mut, 2014) Se implemento este método debido a que es conocido que la presencia de retardos puede desestabilizar el sistema. (Sheridan T. , 1993)

En la ilustración 33 se puede apreciar la complejidad del sistema en los diferentes modos de manejo, donde se visualizan las diferentes condiciones que debe cumplir el sistema para que el robot desarrolle las ordenes enviadas por el usuario por medio del emisor. La principal condición que se debe cumplir es que no se debe hacer uso de los dos modos simultáneamente.



Fuente: propia (2020).

Ilustración 34- Medidas del robot

Las medidas finales del robot son de 50cm x 40 cm x 40 cm (véase ilustración 34), las partes agregadas por el presente proyecto no modificaron sus medidas iniciales debido a que estas fueron situadas estratégicamente en la parte inferior del robot.

VI. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se exponen las conclusiones del proyecto actual a partir de los resultados obtenidos.

- 1) Se logro identificar un modelo de control que no elimina el retraso existente, pero si evita este, siendo el modelo de control que envía comandos de alto nivel, este modelo no controla en todo momento los movimientos del robot, no obstante, envía ordenes más complejas que haciendo uso de un microcontrolador como intermediario interpreta dichas órdenes y las ejecuta hasta que el usuario desee lo contrario.
- 2) Se desarrollo un PI y un modelo ON/OFF para el control de la velocidad del robot, las pruebas realizadas demostraron que el modelo ON/OFF tiene una alta variación en el tiempo en comparación con el PI, debido a esto se implemente el PI para mantener una velocidad constante sin importar el terreno.
- 3) Se logro el control del brazo situado en la parte superior del robot, haciendo uso de los canales del receptor directamente sin que la información sea procesada por el microcontrolador debido al retraso que este genera.
- 4) El robot logro superar las diferentes pruebas fijadas gracias a su sistema de cuatro ruedas, este le facilita el desplazamiento cuando se encuentra con obstáculos ya que podemos manipular cada llanta de manera individual en el modo manual.
- 5) En el presente proyecto, se logró cumplir con los diferentes objetivos fijados, integrando diferentes componentes como ser, comunicación por RF, lectura de señales PWM, PID para controlar la velocidad de nuestro robot, microcontrolador PIC18F45K22, etc. Para lograr un sistema capaz de controlar los diferentes mecanismos de un robot dedicado a monitorear las fincas de café.

VII. RECOMENDACIONES

1. Al diseño del sistema electrónico creado se le pueden realizar futuras modificaciones con el fin de expandir su uso, por ejemplo, el uso de módulos de RF con mayor alcance.
2. Se le puede agregar un sistema de recolección de imágenes que permita crear una base de datos para el provecho que el usuario requiera.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, C. (2014). Diseño de Interfaz Gráfica de Usuario. *WICC 2014 XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación* (págs. 541-542). San Luis: Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina .
- Arroyave, M., Mazo, D., Cano, J., Arias, M., Vergara, J., Ospina, N., . . . Sierra, C. (2006). *RTT: ROBOT PARA NAVEGACIÓN EN TERRENOS IRREGULARES*. Cuenca: Scientia et Technica.
- Aström, K., & Hägglund, T. (2009). *CONTROL PID AVANZADO*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Aulestia, P., Molina, M., & Talahua, J. (2012). *Diseño y Construcción de un Prototipo de un Robot Espía de Vigilancia Remota y Monitoreo en Tiempo Real para los Hogares del Cantón Latacunga*. Latacunga.
- Ballesteros, S. A. (2012). *Sistema de teleoperación mediante un interfaz natural de usuario*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Cerón, A. (2005). Sistemas Roboticos Teleoperados. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (págs. 62-72). Bogota D.C: Universidad Militar Nueva Granada.
- Corcos, D. (2011). *EL MODELO ESPIRAL*. ITBA.
- Crespo Cadenas, C. (2008). *Radiocomunicación*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A. 2008.
- Díaz Celis, C., & Romero, C. (2012). *Navegación de robot móvil usando Kinect, OpenCV y Arduino Mobile robot navigation using Kinect, OpenCV and Arduino*. Villavicencio: Universidad de los Llanos.

- Digital, P. (30 de marzo de 2013). Honduras el país más afectado con la roya del cafeto según organismo especializado. *Proceso Digital*, págs. 2-5.
- Fariño, G. (2011). *Modelo Espiral de un proyecto de desarrollo de software*. Milagro: Ciencias de la Ingeniería .
- García, A., & Obin, D. (2019). *La roya del café*. Guatemala: PROMECAFE.
- García, A., Day, L., Hatch, D., & Andrews, K. (Junio de 2013). La crisis del café en Mesoamérica. *PROMECAFE*, 2. Obtenido de PROMECAFE: <https://promecafe.net/?p=5211>
- Gerardino, R., Muñoz, B., & Orduña, J. (2014). *Implementación de un Robot Teleoperado Basado en Plataforma Oruga*. Universitaria de Investigación y Desarrollo.
- Gómez, L. S. (2000). Diseño de Interfaces de Usuario Principios, Prototipos y Heurísticas para Evaluación. *ResearchGate*, 1-8.
- Guerra, T., Pardo, C., & Rodríguez, M. (2012). *ADQUISICIÓN DE DATOS CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA BIDIRECCIONAL MULTIPUNTO VÍA ETHERNET*. Tunja: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja .
- Herrera, E., Zambrano, W., & Silva, F. (2012). *Diseño e implementación de un guante sensorizado para el control teleoperado de un prototipo de brazo robótico para aplicaciones de manejo de materiales peligrosos*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESP.
- Janabi-Sharifi, F., & Iraj, H. (2011). Experimental analysis of mobile-robot teleoperation via shared impedance control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2(41), 591-606.

- Kyura, N., & Oho, H. (1996). Mechatronics: an industrial perspective. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10-15.
- MICROCHIP. (2012). *PIC18(L)F2X/4XK22 Data Sheet*. San Jose: Microchip Technology Inc.
- Minguez, J., & Escolano, C. (2011). Sistema de Teleoperación Multi-Robot basado en Interfaz Cerebro-Computador. *RIAI (Revista Iberoamericana de Automática e Informatica Industrial)*, 16-23.
- Murillo Fuentes, J. J. (2013). *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Nuño Ortega, E. (2004). *Teleoperación de Robots: Aplicaciones, Entorno Sensorial y Teleoperación Inteligente*. Barcelona: Universidad politecnica de Catalunya.
- Ortega, M. (2013). *Control Teleoperado del robot RV-M1 mediante dispositivo móvil y Realidad Aumentada*. Barcelona: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- Ortiz, F., Álvares, B., Sánchez, P., & Alonso, D. (2005). *Arquitectura para control de robots de servicio teleoperados*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena .
- Penizzotto, Slawiński, & Mut. (2014). Analysis and Experimentation of a Mobile Robot Teleoperation System Over Internet. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 1191-1198.
- Pérez, F., Valdés, E., & Arias, O. (2013). Sistema de Adquisición de Datos con comunicación inalámbric. *RIELAC (Revista de Ingeniería Electronica, Automática y Comunicaciones)*, 63-73.

Rider, Vogel, Dille, Dhuyvetter, & Kastens. (2006). *Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems*. New York: Springer Science & Business Media.

Ruiz, F., Jesús, M., Ullate, A., María, J., Oliván, S., & Antonio, J. (s.f.). *Interfaces de usuario: diseño de la visualización de la información como medio para mejorar la gestión del conocimiento y los resultados obtenidos por el usuario*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

SANVALERO, f. (2014). INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES POR RADIOFRECUENCIA. Violeta Parra, Zaragoza, España.

Sheridan, T. (1992). *Musings on Telepresence and Virtual Presence*. Presence.

Sheridan, T. (1993). Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. *IEEE Trans. Robot. Autom*, 592-606.

Suay Belenguer, J. M. (2002). *Radiocomunicaciones*. Alicante: El de Pagan.

Valdés, F., & Pallás, R. (2007). *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC*. Barcelona: MARCOMBO, EDICIONES TÉCNICAS.

Villa, F., Gutiérrez, J., & Porta, M. (2009). *Vehículo robótico: autónomo y teleoperado con una PDA*. La Paz: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.