



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA  
Y LA MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

AUTOR: SANCHEZ SAMANIEGO FRANCISCO ALEJANDRO

TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA  
INSPECCIÓN VISUAL DE TUBERÍA OPERADO REMOTAMENTE PARA LA  
EMPRESA FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES”

DIRECTOR: ING. OLMEDO FERNANDO  
CODIRECTOR: ING. CHACÓN ALEJANDRO

SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE 2014

## CERTIFICADO DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA INSPECCIÓN VISUAL DE TUBERÍA OPERADO REMOTAMENTE PARA LA EMPRESA FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES”** fue realizado en su totalidad por Francisco Alejandro Sanchez Samaniego, como requerimiento parcial para la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica.

---

Ing. Fernando Olmedo  
DIRECTOR

---

Ing. Alejandro Chacón  
CODIRECTOR

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, SANCHEZ SAMANIEGO FRANCISCO ALEJANDRO**

### **DECLARO QUE:**

El proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA INSPECCIÓN VISUAL DE TUBERÍA OPERADO REMOTAMENTE PARA LA EMPRESA FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES**”, ha sido desarrollado con base a una exhaustiva investigación respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este proyecto es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Noviembre 2014

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA INSPECCIÓN  
VISUAL DE TUBERÍA OPERADO REMOTAMENTE PARA LA EMPRESA  
FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES”**

**ELABORADO POR:**

---

**Francisco Alejandro Sanchez Samaniego**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

---

**Ing. Francisco Terneus**  
**Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

Sangolquí, Noviembre 2014

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

### **AUTORIZACIÓN**

Yo: Francisco Alejandro Sanchez Samaniego

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARA INSPECCIÓN VISUAL DE TUBERÍA OPERADO REMOTAMENTE PARA LA EMPRESA FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Francisco Alejandro Sanchez Samaniego

Sangolquí, Noviembre 2014

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente proyecto de grado a mis padres, Antonio y Rocío, a mis abuelos, Francisco y Carmen, a mis hermanas, Yadira y Maritza, a mis sobrinos Mario Nicolás y Matías, a toda mi familia quienes siempre supieron apoyarme y creyeron en mí y a Jessica, mi compañera y amiga.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres, Antonio y Rocío, sin quienes nada de esto sería posible y a quienes debo, lograr este nuevo objetivo en mi vida. A mis abuelos Francisco y Carmen, cuyo apoyo y consejo jamás me faltó. Y agradezco especialmente a Dios, quien me dio salud, esperanza y vida.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3. ALCANCE DEL PROYECTO .....	4
1.3.1. SISTEMA MECÁNICO .....	4
1.3.2. SISTEMA ELECTRÓNICO .....	5
1.4. SISTEMA DE CONTROL .....	7
1.5. OBJETIVOS .....	9
1.5.1. OBJETIVO GENERAL .....	9
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
1.6. METODOLOGÍA DE DISEÑO .....	10
1.6.1. NORMA VDI 2221 .....	10
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO .....	12
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS .....	12
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS .....	14
2.3. TELERROBÓTICA .....	15
2.3.1. Elementos de un sistema teleoperado: .....	15
2.3.2. Aplicaciones de la telerrobótica .....	16
2.3.3. Métodos de Control en Telerrobótica .....	20
2.3.4. Interfaces en Telerrobótica .....	22
2.4. ROBOTS MÓVILES .....	24
2.4.1. Configuración Ackerman .....	25
2.5. ROBOTS PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA .....	28
CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA .....	31
3.1. ETAPA 1. CLARIFICAR Y DEFINIR LA TAREA .....	31
3.1.1. Método de Despliegue de la Casa de la Calidad (QFD) .....	31
3.1.2. Tabla de Especificaciones .....	35



3.2. ETAPA 2. DETERMINAR LAS FUNCIONES Y SUS ESTRUCTURAS .....	37
3.2.1. Esquematación Funcional del Robot.....	37
3.2.2. . Identificación de las funciones Secundarias.....	37
3.3. Etapa 3. BUSCAR LOS PRINCIPIO DE SOLUCIÓN Y SUS VARIANTES.....	38
3.3.1. Desarrollo de la Matriz Morfológica .....	38
3.3.2. Análisis de la Matriz Morfológica .....	39
3.3.3. Solución Principal.....	59
3.4. Etapa 4 Dividir en módulos realizables.....	60
3.4.1. Estructura de los módulos .....	60
3.5. Etapa 5: Desarrollar esquemas de los módulos principales.....	60
3.5.1. Módulo 1: Estructura mecánica .....	60
3.5.2. Módulo 2: Estructura Electrónica.....	63
3.5.3. Módulo 3: Estructura de Control .....	63
3.6. Etapa 6 Completar el esquema definitivo .....	66
3.6.1. Módulo 1: Estructura Mecánica .....	66
3.6.2. Módulo 2: Estructura Electrónica.....	68
3.6.3. Módulo 3: Estructura de Control .....	74
3.7. Etapa 7: Preparar las instrucciones de operación y de producción .....	81
CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA.....	82
4.1. CAMBIOS REALIZADOS AL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA .....	82
4.2. DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	83
4.3. PROCESO ILUSTRADO DE CONSTRUCCIÓN.....	87
4.3.1. Corte y Ensamblaje de Plataformas .....	87
4.3.2. Ubicación y Fijación de Elementos .....	89
4.3.3. Ensamblaje del Montaje de la Cámara.....	90
4.3.4. Sujeción de la Cámara y Montaje.....	90
4.3.5. Cableado e Interconexión de Componentes .....	91
4.3.6. Montaje de Sensores .....	92
4.3.7. Montaje de Ruedas.....	92
4.4. RESULTADO FINAL.....	93

CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DEL SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA .....	94
5.1. DISEÑO DE PRUEBAS .....	94
5.2. EVALUACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE .....	95
5.2.1. PAN y TILT de la cámara.....	95
5.2.2. Robot de Pequeñas Dimensiones .....	96
5.2.3. Buena Autonomía .....	98
5.2.4. Comunicación a Gran Distancia .....	99
5.2.5. Medir Temperatura y Presencia de Gases .....	102
5.2.6. Control de Velocidad del Robot .....	102
5.2.7. Medición de Distancia Recorrida .....	103
5.2.8. Sistema Fácil de Utilizar .....	104
5.2.9. Bajo Costo.....	105
5.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN A LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE ....	105
5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS AL SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA.....	106
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	113
6.1. CONCLUSIONES .....	113
6.2. RECOMENDACIONES .....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robot para inspección de tubería ROVVER 125 .....	2
Figura 2. Dimensiones propuestas del robot.....	4
Figura 3. Lámpara de iluminación LED.....	5
Figura 4. Sensor de Ultrasonido .....	6
Figura 5. Cámara FPV 720p HD .....	6
Figura 6. Arduino Mega 2560.....	8
Figura 7. Cable para Comunicación RS-485.....	8
Figura 8. Metodología de Diseño VDI 2221 .....	11
Figura 9. Elementos de un Sistema Teleoperado .....	16
Figura 10. Sistema de Teleoperación Espacial.....	17
Figura 11. Arquitectura de un Sistema de Exploración Submarina "Victor" .....	18
Figura 12. US Air Force Predator .....	19
Figura 13. SARGE (UGV) .....	19
Figura 14. Sistema de Teleoperación Médica.....	20
Figura 15. Teleoperación de un Robot Utilizando Control Supervisado. ....	22
Figura 16. Ejemplo de Interfaz Directa.....	23
Figura 17. Ejemplo de Interfaz Multimodal.....	23
Figura 18. Ejemplo de un Sistema con Base Háptica .....	24
Figura 19. Configuración Ackerman.....	26
Figura 20. Configuración Triciclo .....	26
Figura 21. Robot Terragator Configuración Skid Steer .....	27
Figura 22. Versatrax 300 VL .....	28
Figura 23. Versatrax 150.....	28
Figura 24. Versatrax 100.....	29
Figura 25. Nanomag .....	29
Figura 26. TR2000 .....	29
Figura 27. MINIBADGER .....	29
Figura 28. BADGER.....	30
Figura 29. TITAN .....	30
Figura 30. Robot Serie ROVION.....	30

Figura 31. Matriz QFD.....	33
Figura 32. Diagrama de Caja Negra de la Función Principal. ....	37
Figura 33. Diagrama de Funciones Secundarias .....	37
Figura 34. Diagrama del Cuerpo Libre .....	48
Figura 35. Micromotor Pololu .....	51
Figura 36. Encoder de Cuadratura Pololu.....	55
Figura 37. Batería LiPo .....	58
Figura 38. Regulador de Voltaje (LM2596) .....	58
Figura 39. Esquema Plataforma Base .....	61
Figura 40. Esquema Plataforma Superior .....	62
Figura 41. Ensamblaje Plataforma Base, Superior y Tapa .....	62
Figura 42. Diagrama del Circuito .....	63
Figura 43. Diagrama de Flujo del Sistema Robótico .....	64
Figura 44. Diagrama de Bloques Control Manual .....	65
Figura 45. Diagrama de Bloques Control Automático .....	65
Figura 46. Plataforma Base .....	66
Figura 47. Plataforma Superior .....	67
Figura 48. Ensamblaje de Plataformas. ....	67
Figura 49. Arduino Mega 2560 y su ensamble con el Arduino Sensor Shield ...	68
Figura 50. Drives L298.....	69
Figura 51. Relé 5VDC .....	70
Figura 52. Leds de Iluminación .....	70
Figura 53. Placa para Comunicación RS-485 .....	71
Figura 54. Sensor DHT21 .....	71
Figura 55. Módulo Sensor MQ-9.....	72
Figura 56. Sensor HC-SR04 .....	72
Figura 57. Encoder de Cuadratura Marca Pololu.....	73
Figura 58. Configuración de Puertos en Labview .....	75
Figura 59. Sensor DHT21 Labview .....	75
Figura 60. Encoder de Cuadratura Labview.....	76
Figura 61. Encoder de Cuadratura HMI .....	76
Figura 62. Sensor HC-SR04 Labview .....	77

Figura 63. Sensor MQ-9 Labview .....	77
Figura 64. Adquisición de Video Labview .....	78
Figura 65. Control Manual/Automático Labview.....	78
Figura 66. Control de Motores Labview .....	79
Figura 67. Control Manual Diagrama de Bloques Labview .....	79
Figura 68. Diagrama de Bloques Casos en Labview .....	80
Figura 69. Control Automático Labview .....	81
Figura 70. Diagrama del Proceso de Construcción (1 de 3) .....	84
Figura 71. Cortador Láser FL1490.....	87
Figura 72. a) Plataforma Base b) Tapa Superior c) Plataforma Superior .....	88
Figura 73. Ubicación de elementos a) Plataforma Base b) Plataforma Superior c) Circuitos de Comunicación .....	89
Figura 74. Ensamble Montaje de Cámara.....	90
Figura 75. Sujeción de la Cámara a la Plataforma Base .....	91
Figura 76. Interconexión de Elementos.....	91
Figura 77. Montaje de Sensores .....	92
Figura 78. Montaje de las Ruedas .....	92
Figura 79. Resultado Final del Robot para Inspección de Tubería .....	93
Figura 80. Contenedor de Transporte del Robot.....	93
Figura 81. PAN y TILT de la cámara.....	96
Figura 82. Simulación Tubería de 8 plg. ....	97
Figura 83. Prueba en Tubería de 8 plg. ....	97
Figura 84. Prueba en Tubo de 10 plg.....	98
Figura 85. Imágenes Obtenidas del Robot para Inspección de Tubería .....	100
Figura 86. Sensor DHT21 y MQ9.....	102
Figura 87 Control de Velocidad del Robot .....	103
Figura 88. Medición de Distancia Recorrida (Encoder).....	103
Figura 89. Pantalla HMI .....	104
Figura 90. Software para Generación de Informes de Inspección WINCAN..	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos del Cliente .....	32
Tabla 2. Características Técnicas.....	32
Tabla 3. Resultados Matriz QFD.....	34
Tabla 4. Especificaciones Técnicas .....	36
Tabla 5. Matriz Morfológica de Soluciones .....	39
Tabla 6. Requerimientos Mínimos de Labview en Windows.....	40
Tabla 7. Características Técnicas Arduino Mega 2560.....	43
Tabla 8. Características Técnicas Arduino Uno Rev3.....	44
Tabla 9. Tabla Comparativa Módulos Arduino .....	44
Tabla 10. Tabla Comparativa Motores AC y Motores DC .....	46
Tabla 11. Tabla Comparativa Motores DC.....	47
Tabla 12. Tabla Comparativa Circuitos de Potencia .....	51
Tabla 13. Tabla Comparativa de Sensores de Temperatura .....	52
Tabla 14. Tabla Comparativa Sensores de Gas .....	52
Tabla 15. Tabla Comparativa de Sistemas de Visión.....	56
Tabla 16. Comparación Baterías NiCd y Baterías LiPo .....	57
Tabla 17. Solución Principal.....	59
Tabla 18. Dimensiones de Elementos a Utilizarse.....	61
Tabla 19. Pines L298 conectados al Arduino Sensor Shield.....	69
Tabla 20. Pines Relé 5 VDC Conectados al Arduino Sensor Shield.....	70
Tabla 21. Pines SN75179B Conectados al Arduino Sensor Shield .....	71
Tabla 22. Pines DHT21 Conectados al Arduino Sensor Shield .....	72
Tabla 23. Pines Módulo MQ-9 Conectados al Arduino Sensor Shield ...	72
Tabla 24. Pines Sensor HC-SR04 Conectados al Arduino Sensor Shield.....	73
Tabla 25 Pines Encoder Conector al Arduino Sensor Shield. ....	73
Tabla 26. Conexionado General de Pines Arduino Sensor Shield.....	74
Tabla 27. Leyenda del Diagrama de Construcción .....	86
Tabla 28. Requerimientos del Cliente .....	94
Tabla 29. Evaluación PAN y TILT de la cámara .....	96
Tabla 30 Resultados Robot Pequeñas Dimensiones.....	98

Tabla 31. Resultado Pruebas de Autonomía .....	99
Tabla 32. Resultado Pruebas de Comunicación. ....	101
Tabla 33. Resultados Pruebas de Sensores.....	102
Tabla 34. Resultados Control de Velocidad del Robot.....	103
Tabla 35. Resultados Pruebas de Medición de Distancia Recorrida ...	104
Tabla 36. Resultado Sistema Fácil de Utilizar.....	104
Tabla 37. Resultado Bajo Costo .....	105
Tabla 38. Resultados Evaluación Requerimientos del Cliente.....	105
Tabla 39. Parámetros de Ponderación Cualitativa.....	106
Tabla 40. Requerimientos del Cliente y Ponderación .....	106
Tabla 41. Características Rovion Crawler RX130.....	108
Tabla 42. Análisis Comparativo Crawler Rovion RX130 y el Sistema Robotizado de Inspección de Tubería .....	108
Tabla 43. Dimensiones Finales del Robot para Inspección de Tubería	113

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A. Resumen entrevista realizada el Gerente de FSB  
RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES**

**ANEXO B. Planos Parte Mecánica Robot para Inspección de  
Tubería**

**ANEXO C. Manual de Usuario**

**ANEXO D. Manual Montaje de la Cámara BOSCAM HD19**

**ANEXO E. Manual Cámara BOSCAM HD19**

**ANEXO F. Costo Total**

**ANEXO G. Diagrama Eléctrico**

**ANEXO H. Vista Explosionada del Robot para Inspección de  
Tubería**

**ANEXO I. Diagrama de Programación en Labview**



## RESUMEN

El presente proyecto de grado consiste en el diseño y construcción de un robot para inspección visual de tubería operado remotamente para la empresa “FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES”, el cual está diseñado mecánicamente para ingresar dentro de tuberías de 8 plg., y con una autonomía capaz permitir el avance de 36 metros dentro de la misma para la búsqueda y detección de errores. La obtención de imágenes se la realizó mediante visión artificial pero el encargado de cerrar el lazo de control es el operador, quien mediante el análisis del video en primera persona otorgado por el HMI detecta y ubica la falla, además de poseer la capacidad de un análisis posterior del trayecto realizado por el robot dentro de la tubería, gracias a que dicha información se almacena dentro de una memoria “MicroSD”, la cual puede ser extraída para apreciar los videos en alta definición en un ordenador. Los sensores se encargan del monitoreo de temperatura, humedad, presencia de gases inflamables y de informar la distancia recorrida por el robot en el interior de la tubería. Para la obtención de los valores de temperatura y humedad se utilizó un sensor “DHT21” basado en comunicación “One Wire”, el sensor encargado de detectar la presencia de gases inflamables es un MQ9 y para obtener una medida de la trayectoria recorrida por el robot de inspección se manipuló dos sensores de cuadratura. El sistema está basado en tecnología “Arduino” y el HMI se programó enteramente en el software “Labview” utilizando el “Arduino Toolkit” para “Labview”.

**Palabras Clave: ROBOT, INSPECCIÓN, TUBERÍA, ARDUINO, LABVIEW, VISIÓN ARTIFICIAL.**

## ABSTRACT

This graduation project consists in the design and construction of a pipeline inspection robot operated by remote control for “FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES” enterprise, which is designed mechanically to work inside an 8 inch, pipeline and an autonomy capable of advancing 36 meters with the objective of search and detecting errors. The obtaining of images is realized by artificial vision but the operator is in charge of closing de control loop, who through the video analysis in first person granted by the HMI detects and locates de fail, also has the capability of subsequent analysis of the travelled path by the robot inside the pipeline, granted by in a “MicroSD” card which records and save the video information, which can be extracted to appreciate the video in high definition using a computer. The sensors are in charge of monitoring temperature, humidity, presence of flammable gases and to inform the distance travelled by the robot inside the pipeline. To obtain the temperature and humidity values a “DHT21” was used based on “OneWire” communication, an MQ9 sensor is in charge of the flammable gases detection and to register the travelled distance by the robot two quadrature encoders were installed. The system is based in “Arduino” technology, the HMI was fully programmed in “Labview” using the “Arduino Toolkit” for “Labview”.

**Keywords: ROBOT, INSPECTION, PIPELINE, ARDUINO, LABVIEW, ARTIFICIAL VISION.**

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

La “Escuela Politécnica del Ejército” muestra través de su historia un liderazgo nato e impulso tecnológico que se ha demostrado en su fructífera historia. En el presente proyecto se busca, gracias a los conocimientos impartidos en esta prestigiosa institución, solucionar un problema suscitado desde ya hace un tiempo en la industria ecuatoriana pero sin solucionarse por los costos exorbitantes que esto significa porque este tipo de tecnología únicamente se la importa desde países avanzados tecnológicamente.

El problema mencionado es la falta de capacidad de muchas industrias para verificar interiormente una tubería ya sea de gas o petróleo, pero el problema no termina ahí porque incluso diariamente convivimos con consecuencias directas o indirectas de esta contrariedad. Todos los días nos encontramos con noticias relacionadas con el municipio de nuestra localidad, mencionando la destrucción de toda una carretera por problemas de alcantarillado ocasionando incontables pérdidas económicas y contratiempos.

La solución propuesta para este problema es la creación de un robot capaz de ingresar en la tubería mediante un sistema de locomoción propio que permita recorrer la misma y nos brinde la capacidad de verificarla sin necesidad de destruirla ahorrando incontables recursos económicos.

Este robot contaría con un sistema capaz de permitirle moverse a lo largo de la tubería la cual necesita ser inspeccionada, nos mostraría la distancia recorrida, parámetros como temperatura y humedad de la misma y su principal función, llevaría una cámara encargada de permitir la observación en tiempo real del interior de la tubería.

En varios países ya se han implementado robots de este tipo (ver figura 1), para trabajos con gobiernos seccionales o con empresas de gas y petróleo pero importar uno desde Japón está alrededor de los \$500000 dólares lo que ha países pequeños como el nuestro sugiere una enorme inversión.



Figura 1. Robot para inspección de tubería ROVER 125

FUENTE: (Panatec, 2013)

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la industria relacionada con la robótica en el país pasa desapercibida, no se hallan soluciones tecnológicas óptimas, estratégicamente presenta un enfoque tradicional basado en fuerza de trabajo y maquinaria mecánica. Estas soluciones son favorables pero en un mundo tan cambiante como el nuestro tenemos es necesario hallar tecnologías capaces de competir con países industrializados, los cuales todavía nos llevan años de ventaja en el campo mencionado.

La presente tesis se justificaría con el hecho de que un robot como el propuesto daría impulso para el desarrollo de una industria basada en la producción de autómatas, encargados de solucionar problemas cotidianos y que no sea solamente aplicado a la industria como tal, sino también a diferentes aspectos que se presenten en la vida diaria.

Robots para diferentes tareas existen ya en el mercado en varios países del mundo pero su costo para traerlos al país muchas veces excede los beneficios que propone una inversión de tal magnitud. Fabricarlos en el país mediante diseños propios y con mano de obra ecuatoriana, como se propone en el robot para inspección visual de tubería, reduciría enormemente los costos. Provocando una tecnología al alcance de los industriales de nuestro país y esto a su vez fomenta la investigación en este campo y darle a la importancia que se merece en un mundo globalizado.

El robot para inspección visual de tuberías muestra una ventaja significativa al encontrarse en la categoría de pruebas no destructivas, esto se debe a su utilización, en la cual no se requiere el romper o dañar ningún elemento analizado, el robot simplemente recorre la tubería propuesta en busca de fallas mediante inspección visual para saber exactamente donde se encuentra. La solución, de esta manera, provoca el mínimo impacto medio ambiental, la mínima utilización de recursos y sobre todo un mínimo de tiempo invertido para así optimizar la solución de problemas.

La importancia radica en buscar la solución a un tema ya resuelto en países avanzados. En nuestro país por los costos requeridos y sobre todo por la falta de una industria propia dedicada a la fabricación de autómatas encargados de solucionar problemas de esta índole establecería un precedente, mostrando así, la utilidad del robot y su aplicabilidad en la industria. Fomentaría la inversión en la misma al obtener resultados positivos, además de ahorrar dinero, evitar daño innecesario al medio ambiente y aportar al desarrollo e investigación en el Ecuador.

### 1.3. ALCANCE DEL PROYECTO

#### 1.3.1. SISTEMA MECÁNICO

El robot será diseñado para tubería de 8 pulgadas, requerimiento pedido por la empresa auspiciante.

Dimensiones propuestas para el robot (figura 2)

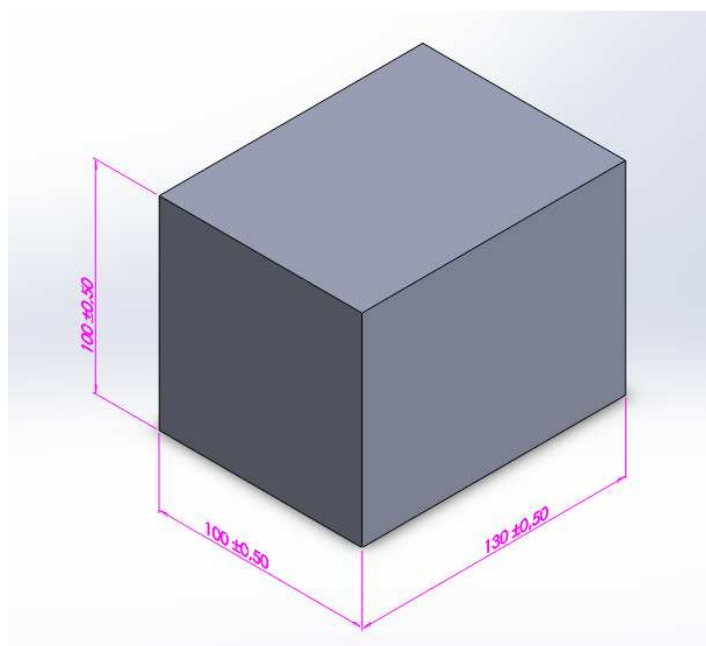


Figura 2. Dimensiones propuestas del robot

Las dimensiones propuestas para el robot están sujetas a variaciones para optimizar su desempeño dentro de la tubería.

El robot tendrá un sistema de locomoción de 4 ruedas con un eje delantero móvil para direccionamiento y tracción trasera. Aunque se planea analizar otras opciones capaces de mejorar su funcionamiento.

El material para el robot será acrílico, principalmente por su calidad de prototipo, en caso de una decisión de la empresa auspiciante de invertir más recursos, se utilizará un chasis de diferente material

### 1.3.2. SISTEMA ELECTRÓNICO

Ciertos aspectos son determinantes en el robot a continuación se tratará con mayor detalle los principales:

- **Alimentación**

Sistema de alimentación por baterías para el robot. El ordenador personal encargado de la interfaz gráfica posee alimentación propia.

- **Iluminación**

Para la observación de los desperfectos dentro de la tubería se utilizará diodos LED de alta intensidad (véase figura 3), los cuales otorgarán la iluminación necesaria para lograr la inspección visual del mismo.



Figura 3. Lámpara de iluminación LED

FUENTE: (Ebay, 2014)

La capacidad de iluminación dependerá del diseño de la misma pero su voltaje de operación será de entre 5v y 12v.

- **Sensores**

Debido a la gran cantidad de variables a monitorear: humedad, temperatura, gas y distancia tanto recorrida como más próxima para evitar colisiones. Se probará distintas posibilidades hasta obtener la mejor solución para el problema propuesto. Uno de los elementos propuestos para evitar colisiones y manejo del control automático es el sensor de ultrasonido presentado en la figura 4.



Figura 4. Sensor de Ultrasonido

FUENTE: (Ebay, 2014)

Para medir la distancia recorrida por el robot se utilizará “encoders”, encargados de medir la distancia rotacional. La circunferencia de la rueda es siempre la misma, otorgándonos así una constante comparable con un patrón de medida para distancia recorrida.

La cámara para adquisición de imágenes (figura 5)



Figura 5. Cámara FPV 720p HD

FUENTE: (Ebay, 2014)



- **Actuadores**

Los actuadores básicamente serán los motores los cuales permitirán la locomoción del mismo. Se ubicara un motor en cada rueda del eje trasero para tracción de entre (5v y 12v) los cuales darán movimiento al mismo, el servomotor de dirección irá ubicado en el eje delantero el cual será móvil. Se planea analizar varias alternativas de locomoción hasta hallar la adecuada.

También se usarán 2 servomotores acoplados en el montaje de la cámara de video permitiendo 360° de PAN y 180° de TILT.

#### **1.4. SISTEMA DE CONTROL**

Cabe destacar que por requerimientos de la empresa auspiciante se requerirá una autonomía de 36m del robot ya que la longitud estándar de tubería para petróleo es de 12 m y solicita que el robot solo inspeccione 3 de estos seguidos al mismo tiempo.

Las principales características a analizarse del sistema de control para el presente proyecto de tesis propuesto son:

- Entradas digitales
- Entradas analógicas
- Procesamiento de señales
- Análisis de datos
- Toma de decisiones
- Control de actuadores
- Sistema HMI

El robot tendrá dos modalidades una manual que permitirá que el mismo sea operado remotamente desde una interfaz HMI que permitirá el total control del mismo el cual será manipulado por un operador. La segunda modalidad será un sistema autónomo que será controlado por un software especializado

el cual se programable de acuerdo a las necesidades del operador dependiendo de las variables a monitorear por el sistema.

Para los objetivos previamente propuestos se utilizará un tecnología Arduino (figura 6) o Microcontroller(PIC):



Figura 6. Arduino Mega 2560

FUENTE: (Arduino, 2014)

Se planea utilizar un sistema de control ON/OFF porque cumple con los requerimientos del sistema ya que el robot encuentra limitaciones en la tubería al tener que avanzar o retroceder y sortear curvas dentro del mismo sin mayores complicaciones, en caso de tener mayores retos se tomará un nuevo sistema de control.

La comunicación propuesta será RS485 debido a la longitud permisible de la misma (1200 m), lo que cumpliría con la autonomía propuesta para el robot que es de 36 m.

Cable propuesto para el proyecto (figura 7).



Figura 7. Cable para Comunicación RS-485

FUENTE: (Ebay, 2014)

**Características:**

Compatibilidad con cámaras FPV (First Person View) y PTZ (Pan Tilt Zoom).

Capacidad de alimentación.

Longitud: 100 ft

Peso: 2 lb.

**1.5. OBJETIVOS****1.5.1.OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un robot para inspección visual de tubería operado remotamente para la empresa “FSB RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES”

**1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar específicamente los componentes mecánicos y electrónicos del robot para que sea posible su operación dentro de una tubería de 8 pulgadas de diámetro.
- El robot tendrá una autonomía de 36 metros por requerimiento de la empresa auspiciante.
- Realizar el algoritmo de control para el robot de tal manera que cumpla con las dos tareas propuestas: que tenga un control autónomo tanto como un control remoto que permita el control a distancia por parte de un operador
- Diseñar la interfaz HMI cuya función sea el control del robot remotamente desde una ubicación fija por un operador.

## **1.6. METODOLOGÍA DE DISEÑO**

Existen múltiples metodologías de diseño pero para el proyecto de grado se ha elegido la norma alemana VDI 2221, debido a que presenta características puntuales además de una notable versatilidad en su desarrollo lo que la convierte, según opinión personal, en la metodología correcta para el diseño propuesto.

### **1.6.1. NORMA VDI 2221**

La norma de diseño VDI 2221 fue creada en Alemania por “La sociedad de ingenieros profesionales” (Verein Deutscher Ingenieure), tomando en consideración un enfoque sistemático del problema.

“El proceso de diseño, como parte de la creación del producto, se subdivide en fases de trabajo en general, por lo que el diseño presenta un enfoque transparente, racional e independiente de una rama específica de la industria” (Cross, Nigel, 2005)

El proceso de diseño como lo presenta la norma VDI 2221 se basa en 7 etapas, la primera y la más importante es la que se refiere a los requisitos de diseño, esta etapa a lo largo del proceso de diseño sufre varias modificaciones y es recurrente su análisis posterior.

La segunda etapa se refiere a realizar un diagrama de las funciones y subfunciones del sistema. La tercera etapa se busca realizar una matriz morfológica con todas las posibles soluciones a las funciones mencionadas en la etapa dos, cabe recalcar que no se debe exagerar en su número, puesto que dificulta su análisis.

La cuarta etapa pide al diseñador, dividir el proceso de diseño en módulos realizables en este caso por ser un diseño mecatrónico se dividirá en tres estructuras fundamentales: mecánica, electrónica y de control. La quinta etapa se limita a realizar diagramas o bosquejos preliminares de los módulos divididos para finalizarlos en la etapa 6. La etapa 7 se refiere a documentación del producto, construcción y pruebas del mismo. En la figura 8 se puede apreciar las 7 etapas comprendidas en la metodología de diseño VDI 2221.

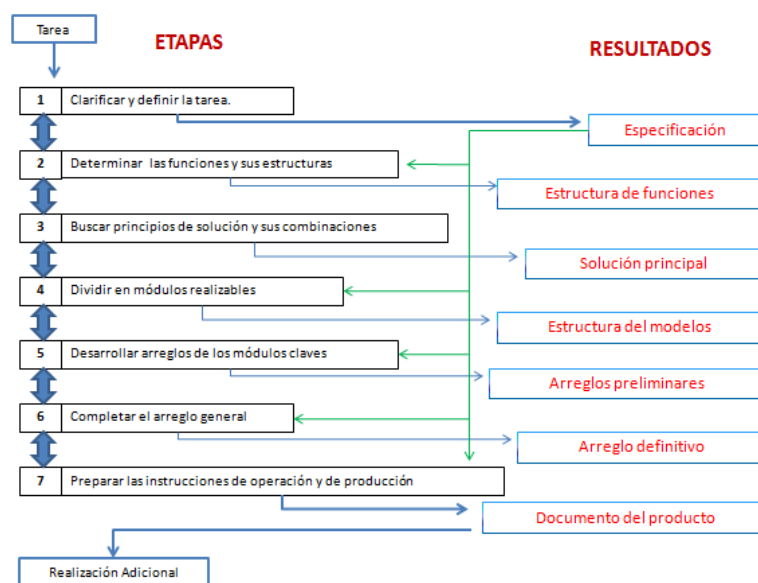


Figura 8. Metodología de Diseño VDI 2221

FUENTE: (Cross, Nigel, 2005)

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Robot, el concepto o definición de robot varía de acuerdo a los países en los que se encuentran o de acuerdo a las asociaciones dedicadas al estudio de la robótica que operan ya sea en conjunto o individualmente. Existen múltiples organizaciones y cada una tiene su definición de robot, las más conocidas y aceptadas son:

- La enunciada por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) 8373 define a un robot como: “un manipulador automáticamente controlado, reprogramable, multiuso, programable en tres o más ejes, que pueden estar fijos en un lugar o moverse para ser usado en aplicaciones de automatización industrial” (ISO, 2011) Esta definición es usada por la “Federación Internacional de Robótica”, la “Cadena de Investigación Europea de Robótica” (EURON), y muchos otros comités de estándares nacionales.
- El Instituto de Robótica de América (RIA, por sus siglas en inglés) utiliza una definición un poco más amplia la cual sostiene: Un robot es un “manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para mover materiales, partes, herramientas o artefactos especializados a través de movimientos variables programados para la realización de una variedad de tareas” (RIA, 2004).
- La Asociación Japonesa de Robótica Industrial (JIRA) define robot como: "Dispositivos capaces de moverse de modo flexible análogo al que poseen los organismos vivos, con o sin funciones intelectuales, permitiendo operaciones en respuesta a las ordenes humanas" (Irene, s.f.).

Entre los expertos alrededor del mundo no existe un consenso sobre la definición de la palabra robot, los anteriores ejemplos son conceptos remitidos

de acuerdo a observaciones dentro de las organizaciones precursoras de los mismos, pero que forman parte de un gran número de axiomas diferentes.

Cabe destacar las siguientes definiciones para su mejor comprensión:

- Teleoperación: conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano. Por tanto, teleoperar es la acción que realiza un ser humano de operar o gobernar a distancia un dispositivo; mientras que un sistema de teleoperación será aquel que permita teleoperar un dispositivo, que se denominará dispositivo teleoperado. (Nuño, Emmanuel, 2004)
- Telerrobótica: conjunto de tecnologías que comprenden la monitorización y reprogramación a distancia de un robot por un ser humano. Se hablará entonces de la teleoperación de un robot, que se denominará telerrobot o robot teleoperado. (Nuño, Emmanuel, 2004)
- Telepresencia: situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse físicamente en el lugar remoto. La telepresencia se consigue realimentando coherentemente al ser humano suficiente cantidad de información sobre el entorno remoto. (Nuño, Emmanuel, 2004)
- Realidad virtual: situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse en un lugar distinto de donde físicamente está gracias a la información generada exclusivamente por un computador. El entorno que se genera, y en el que el operador se encuentra inmerso se denomina entorno virtual, y la situación de estar en él, también se conoce como presencia virtual. (Nuño, Emmanuel, 2004)

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

Al igual que las definiciones de robot, en el contexto mundial se han planteado múltiples clasificaciones de robots, a continuación se mencionan las más utilizadas:

La RIA subdivide a los robots en cuatro clases (Linkmesch, 2013):

- Los artefactos que manipulan objetos con control manual
- Los artefactos automáticos que manipulan objetos con ciclos predeterminados
- Los robots programables de autocontrol con trayectorias continuas de punto en punto
- Los robots programables de autocontrol que toman información del ambiente que los rodea y se mueven inteligentemente en respuesta.

La Asociación de Robots Japonesa (JIRA) ha clasificado a los robots dentro de seis clases sobre la base de su nivel de inteligencia (Damaris, 2010):

- Dispositivos de manejo manual, controlados por una persona.
- Robots de secuencia arreglada.
- Robots de secuencia variable, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
- Robots regeneradores, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
- Robots de control numérico, donde el operador alimenta la programación del movimiento, hasta que se enseñe manualmente la tarea.
- Robots inteligentes, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

Agrupar a todos los robots del mundo dentro de una clasificación sería una tarea relativamente imposible debido a los distintos usos, aplicaciones, configuraciones, materiales, etc., por eso solo existen criterios que nos permiten tener una ligera diferenciación entre los tipos actuales de robots que permitan un estudio más focalizado en cierto aspecto.



## 2.3. TELERROBÓTICA

Existen múltiples dispositivos denominados autómatas, precursores de los robots modernos como: “El gallo de Estrasburgo” (1352) y el “León Mecánico” construido por Leonardo Da Vinci (1515), para citar algunos ejemplos, los cuales eran un avance de gran tecnología para su época. Pero para comprender el nacimiento de los robots modernos nos referimos a los “telemanipuladores”. Raymond Goertz empleado de “Argonne National Laboratory” desarrolló en el año de 1948 el primer telemanipulador cuyo fin era manipular objetos radioactivos evitando el riesgo para el operador. Este consistía en un mecanismo mecánico con el sistema conocido como maestro-esclavo, donde el operador se encontraba a una distancia segura y detrás de un grueso cristal, lo que evitaba su contaminación por material radioactivo.

Los telemanipuladores no han avanzado en su complejidad los últimos años ya que han sido reclusos a aplicaciones específicas como la industria nuclear, militar, espacial, etc., debido a que precisan de un mando continuo por parte del operador y exceptuando el concepto de control supervisado y la mejora de telepresencia promovida por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho con respecto a sus orígenes.

### 2.3.1. Elementos de un sistema teleoperado:

Los elementos de un sistema teleoperado pueden apreciarse en la figura 9, la descripción de sus elementos se detalla a continuación:

- **Operador o teleoperador:** ser humano encargado de realizar la operación a distancia. Puede tratarse tanto de una intervención continua o un control intermitente, en la que se ocupa sobre todo de monitorear e indicar objetivos en lapsos de tiempo.

- **Dispositivo teleoperado:** Mecanismo o máquina destinada a operar en un lugar remoto o peligroso, puede referirse a un manipulador, un robot, un vehículo o un dispositivo similar.
- **Interfaz:** todo dispositivo que permita tanto el envío y recepción de información como el manipulador maestro o los monitores de video. También llamados así a los dispositivos vinculados los cuales permiten la interacción entre el operador y el mecanismo teleoperado.
- **Control y canales de comunicación:** grupo de elementos encargados de modular, transmitir y adaptar las señales transmitidas dentro del sistema teleoperado.
- **Sensores:** elementos cuya finalidad es la recopilación de información, tanto de la zona remota como de la local para su posterior uso en la interfaz y el control.

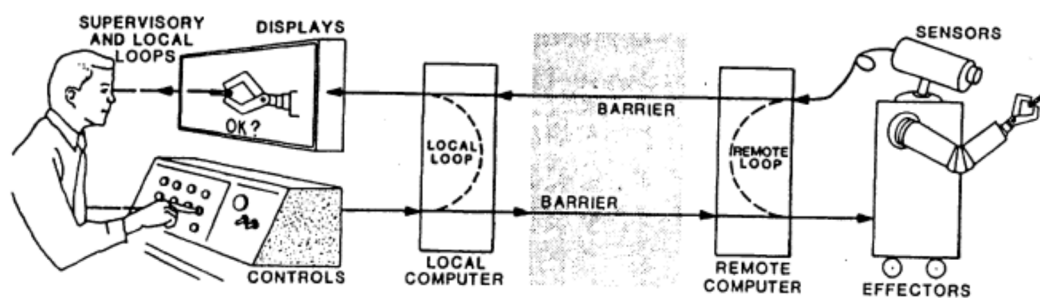


Figura 9. Elementos de un Sistema Teleoperado

FUENTE: (Nuño, Emmanuel, 2004)

### 2.3.2. Aplicaciones de la telerrobótica

#### Aplicaciones en el Espacio

El estudio del espacio debido a sus duras condiciones como falta de oxígeno y extremas temperaturas se han empleado sistemas telerrobóticos para su exploración, las razones principales son:

- Seguridad: Las condiciones en el espacio terminarían con la vida de cualquier astronauta si se intentará una investigación demasiado alejada de la atmósfera terrestre
- Costo: Los costos de enviar pasajeros humanos serían muy altos.
- Tiempo: Debido a la larga duración de muchas exploraciones espaciales, estas operaciones se realizan sin tripulación humana

Las operaciones espaciales también tienen que lidiar con los retardos temporales en las comunicaciones. Las principales aplicaciones de la telerrobótica espacial en este campo son: experimentación y exploración planetaria (Figura 10).

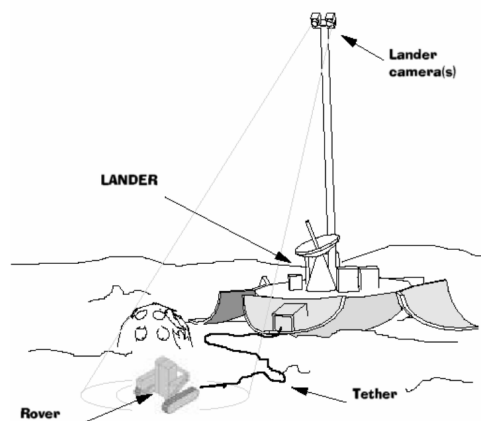


Figura 10. Sistema de Teleoperación Espacial

FUENTE: (Schilling K.J., 2002)

### **Aplicaciones en la Industria Nuclear**

La gran importancia que se le ha dado en este campo es debido a que gracias a la telepresencia se puede tratar y manipular sustancias radioactivas, también permite desplazarse por entornos contaminados, evitando el riesgo de estar en contacto directamente con material radioactivo. En este campo es donde existen la mayor parte de sistemas telerrobóticos.

## Aplicaciones Submarinas

Se denominan ROUV (Remote Operated Underwater Vehicle), esquema mostrado en la figura 11. Estos sistemas son importantes porque pueden acceder a ciertas zonas y profundidades imposibles para un buzo humano. Las principales aplicaciones son: inspección, mantenimiento y construcción de instalaciones submarinas, minería submarina e inspección de suelo submarino. En este tipo de telerrobótica sigue siendo un gran inconveniente el retardo en la comunicación como en las aplicaciones espaciales.

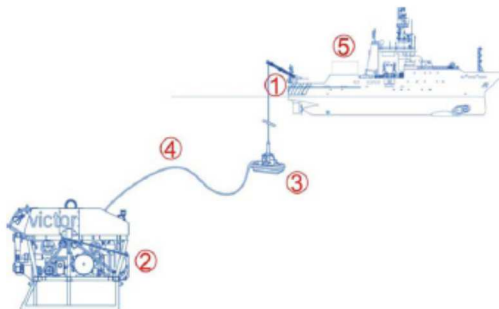


Figura 11. Arquitectura de un Sistema de Exploración Submarina "Victor"

FUENTE: (Flotte Ifremer, 2012)

## Aplicaciones Militares

La mayoría de tecnologías de teleoperación móvil fueron desarrolladas exclusivamente con fines militares como el sistema de monitorización remota mediante el uso de UAV (Unmanned Air Vehicles), como ejemplo tenemos al US Air Force Predator (Figura 12). Las aplicaciones en este campo son muchas como vigilancia, adquisición de objetivos militares, detección de enemigos y reconocimiento, incluso llegan ser capaces de atacar con precisión a objetivos específicos.



Figura 12. US Air Force Predator

FUENTE: (Damaris, 2010)

Otro tipo de vehículos de este tipo son los terrestres llamados UGV (Unmanned Ground Vehicle), los cuales tienen sistemas de comunicación de gran alcance y de mucha velocidad, un ejemplo de estos es el SARGE (Surveillance And Reconnaissance Ground Equipment) creado por Sandia National Laboratories (Figura 13). Los “Terrobots” utilizados para desactivación de bombas y vigilancia, en fin como apoyo para los cuerpos policíacos, son operados en un lazo cerrado desde una conexión por cable o radiofrecuencia, el equipo del que disponen generalmente es un sistema de visión, cámaras infrarrojas, manipuladores robóticos, armas letales y no letales.



Figura 13. SARGE (UGV)

FUENTE: (Linkmesch, 2013)

## Aplicaciones Médicas

En los últimos años ha existido un gran avance en este campo, si nos referimos a los primeros dispositivos como prótesis o dispositivos a personas discapacitadas hasta la tecnología que se encuentra en auge como la telecirugía o telediagnóstico.

La primera cirugía asistida por teleoperación (Ghodoussi M., 2002) se realizó utilizando el sistema robótico llamado "ZEUS" (Figura 14), lo llamativo de este proceso quirúrgico se muestra en la distancia geográfica que separaba al cirujano, el cual se encontraba en la ciudad de Nueva York, en Manhattan, mientras el esclavo o dispositivo teleoperado se hallaba en Satrasburgo, Francia, la cirugía fue una Colectomía Laparoscópica, la operación Lindbergh (apellido del paciente) fue todo un éxito, las telecomunicaciones fueron concedidas por un canal privado de Internet, usando el protocolo UDP/IP, con un retardo promedio de 224 ms.

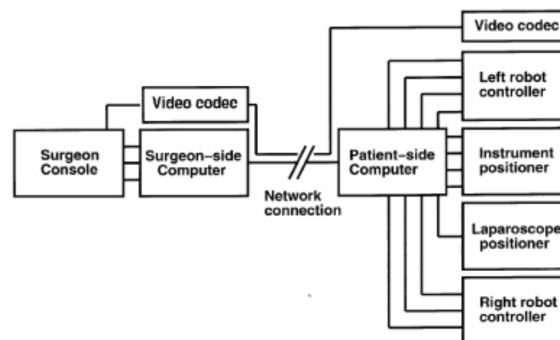


Figura 14. Sistema de Teleoperación Médica

FUENTE: (Ghodoussi M., 2002)

### 2.3.3. Métodos de Control en Telerrobótica

Los objetivos de un sistema de control de teleoperación (Ollero B. A., 2001) son:

- Hacer que el control manual del operador humano sea robusto ante retardos, saturación de los actuadores y otras no linealidades, e incluso ante los propios errores del operador.

- Permitir elevadas prestaciones en la teleoperación (precisión, tiempo de teleoperación, comodidad) haciendo que los bucles de control tengan un comportamiento dinámico apropiado y reduciendo el trabajo del operador para lo cual se llega a realizar eventualmente de forma automática la acomodación y el control de esfuerzos en esquemas de control compartido. La reducción del tiempo de teleoperación con el sitio remoto debe ser importante, debido a que la ventana temporal de comunicaciones puede ser limitada.

La información sensorial más importante mostrada al operador y requerida en este tipo de sistemas, es la información visual.

### **Control Bilateral**

Primero definamos que un control unilateral basa su funcionamiento en la generación de señales de referencia por parte del maestro, ya sean de posición o velocidad para los bucles de control del esclavo.

En el control bilateral existe una realimentación de esfuerzos del operador, se la realiza comúnmente con una retroalimentación cinestésica en la que el sistema convierte la fuerza de contacto del esclavo en una fuerza aplicada sobre la mano del operador.

### **Control Supervisado y Coordinado**

En este tipo de control existe un lazo de control en el sitio remoto y el operador manipula los actuadores, de cualquier manera no existe autonomía en el elemento final, los lazos de control del sitio remoto son utilizados cuando por retardos en la comunicación, el operador no puede controlar directamente al esclavo (Véase Figura 15).

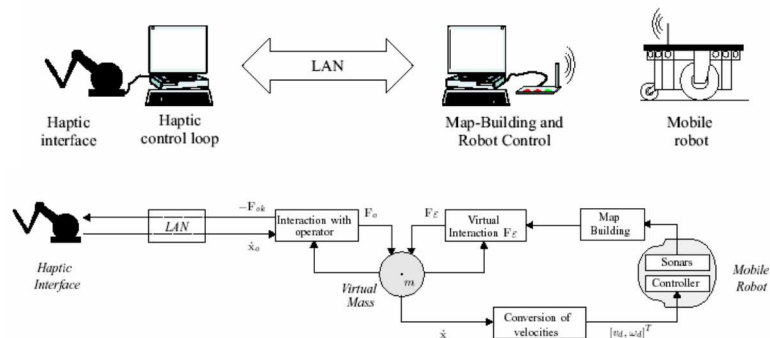


Figura 15. Teleoperación de un Robot Utilizando Control Supervisado

FUENTE: (Diolaiti N., 2002)

El operador monitorea y da commands de alto nivel para que el manipulador los ejecute, estos sistemas son los más usados y estudiados en la actualidad, ya que permiten utilizar modelos virtuales, estimar parámetros entre otras cosas más.

### 2.3.4. Interfaces en Telerrobótica

#### Interfaz Directa

Interfaz más utilizada, el operador controla al manipulador o vehículo mediante joysticks o applets de java en el ordenador. El operador obtiene una realimentación gracias al uso de cámaras montadas en el sitio remoto, estas técnicas proporcionan un nivel muy bajo de telepresencia pero altamente útil.

Estos sistemas son aconsejables en aplicaciones donde el retardo sea casi nulo en tiempo real, esto le permite al teleoperador tomar decisiones en tiempo real también, debido al control continuo del proceso teleoperado. (Véase Figura 16)





Figura 16. Ejemplo de Interfaz Directa

FUENTE: (Linkmesch, 2013)

### Interfaz Multimodal o Multisensorial

Este tipo de interfaz le da al operador múltiples maneras de control, algunos ejemplos típicos de estas diferentes maneras de control son actuadores individuales con realimentación gráfica y realimentación visual. Las interfaces multisensoriales toman información de varios sensores y la combinan en un gráfico integrando a todas ellas, estos gráficos ayudan al operador a controlar mejor el manipulador.

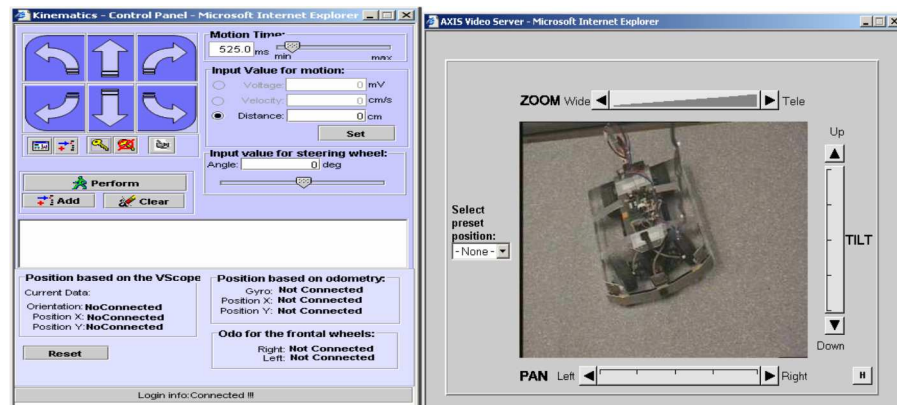


Figura 17. Ejemplo de Interfaz Multimodal

FUENTE: (Irene, s.f.)

### Interfaces para Control Supervisado

Se basan en otorgar toda la información necesaria y disponible para que el operador sienta el máximo de telepresencia en el sitio remoto. Se utilizan dispositivos hápticos con realimentación de fuerza y torque como en la figura

18, utilizan dispositivos de realidad virtual, como guantes, lentes, trackers, y una infinidad de dispositivos que aumenten el nivel de telepresencia del operador en el sitio remoto.

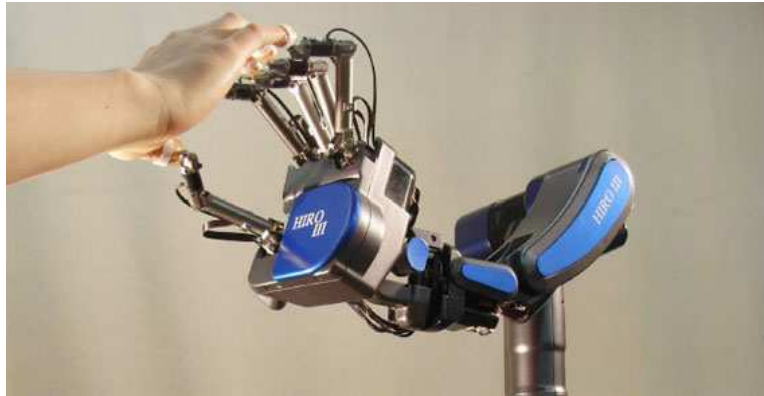


Figura 18. Ejemplo de un Sistema con Base Háptica

FUENTE: (Solutek Informática, s.f.)

## 2.4. ROBOTS MÓVILES

Para entender a este tipo de robots, primero debemos delimitar el concepto de locomoción, que se define como el proceso por el cual un robot puede desplazarse. Existe una gran variedad de modos de moverse sobre una superficie sólida, las maneras más comunes de movilizarse son: ruedas, cadenas y patas.

Debido a su facilidad y cantidad en el mercado, los robots con ruedas son los más comunes además de su mayor capacidad de carga. Los robots basados en patas y en cadenas se consideran como más complicados y sobre todo más pesados para una misma carga útil.

El problema más común con los robots de ruedas es su desempeño en terreno irregular. Porque un robot con ruedas no es capaz de sobrepasar un obstáculo que tenga una altura superior al radio de sus ruedas y la solución más común para este inconveniente es utilizar ruedas más grandes, que en cierto casos no es una solución práctica.

Las orugas o cadenas son una mejor opción para robots que se desempeñen en ambientes difíciles porque las cadenas permiten al robot superar obstáculos relativamente mayores, las ruedas no son aconsejables en estas situaciones debido al daño que reciben del entorno por piedras o arena. El principal inconveniente de las cadenas es su ineficacia, puesto que se produce deslizamiento sobre el terreno al avanzar y al girar. Si la navegación se basa en el conocimiento del punto en que se encuentra el robot y el cálculo de posiciones futuras sin error, entonces las cadenas acumulan tal cantidad de error que hace inviable la navegación por este sistema. En mayor o menor medida cualquiera de los sistemas de locomoción adolece de este problema.

Los robots con patas son mejores para superar terrenos irregulares, pero su construcción plantea gran cantidad de dificultades debido al gran número de grados de libertad que requieren estos sistemas. Los algoritmos necesarios para su control son altamente complicados por el alto grado de coordinación necesario para su movimiento.

A continuación se muestra los sistemas de tracción más comunes de locomoción por ruedas, su propósito es informativo:

#### **2.4.1. Configuración Ackerman**

Este sistema también es conocido como el tipo automóvil, en el cual se utilizan dos ruedas traseras tractoras montadas de manera paralela en el chasis principal del vehículo, a su vez las ruedas delanteras son las encargadas de definir la dirección en la que se desplazará el vehículo.

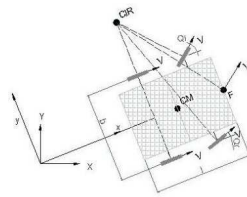


Figura 19. Configuración Ackerman

FUENTE: (Gómez, Mario, A., 2011)

Si se utiliza esta configuración para robots móviles, como se observa en la figura 19, las ruedas delanteras presentan dos ángulos de giro, uno en cada rueda y al momento de realizar el control para solucionar esto se unifica los ángulos de direccionamiento en uno solo pero esto acarrea problemas.

El principal problema de este tipo de tracción es su limitada maniobrabilidad y dado que el robot propuesto para este proyecto de grado trabajará en tuberías que es un sitio con un limitado espacio para movimiento, este sistema de tracción presenta múltiples complicaciones.

### Configuración Triciclo

La configuración triciclo es un sistema de locomoción basado en un eje trasero pasivo, con dos ruedas laterales que se mueven libremente, la rueda frontal sirve tanto para tracción como para el direccionamiento. Su maniobrabilidad es mucho mayor que la presente en la configuración Ackerman como se observa en la Figura 20.

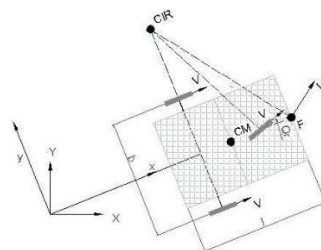


Figura 20. Configuración Triciclo

FUENTE: (Gómez, Mario, A., 2011)

Al existir una sola rueda de direccionamiento, mejora la maniobrabilidad, pero esto a su vez provoca la inestabilidad en terrenos difíciles, además el centro de gravedad tiende a desplazarse cuando el vehículo circula por pendientes, lo que provoca una pérdida de tracción o incluso volcamiento y debido a que el robot para inspección de tubería se moverá en un ambiente alejado del operador y confinado por la tubería un volcamiento podría ocasionar muchos problemas ya que su recuperación se volvería una tarea con demasiadas horas de trabajo e incluso con graves pérdidas de dinero, por lo que esta configuración no es recomendable.

También existe una variación de la configuración triciclo en la cual la rueda delantera es conocida como rueda “loca” y las ruedas traseras son motoras pero esta configuración de igual manera presenta muchos problemas en cuanto a estabilidad.

### **Skid-Steer**

En este sistema se posicionan varias ruedas a cada lado del vehículo que operan simultáneamente. El movimiento diverso del robot se obtiene de combinar las velocidades tanto de las ruedas situadas a la derecha robot como las de las ruedas situadas a la izquierda, un ejemplo se aprecia en la Figura 21.



Figura 21. Robot Terragator Configuración Skid Steer

FUENTE: (Gómez, Mario, A., 2011)

Este sistema proporciona gran cantidad de ventajas, ya que se puede controlar a cada rueda independientemente o en paralelo, lo presenta mayor

maniobrabilidad en espacios reducidos y un aumento de torque total del robot porque se puede usar un motor individual para cada rueda del vehículo.

Esta configuración ya ha sido usada para la inspección y obtención de mapas de tuberías enterradas empleando un sistema de radar conocido como “Ground Penetrating Radar”, además de ser utilizado en operaciones mineras y en exploraciones espaciales no tripuladas.

## 2.5. ROBOTS PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA

Actualmente en el mercado existen varios tipos de sistemas robotizados para inspección de tubería, entre ellos, los más comerciales son:

### FABRICANTE INUKTUM

- **Versatrax 300 VL (Figura 22)**



Figura 22. Versatrax 300 VL

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **Versatrax 150 (Figura 23)**



Figura 23. Versatrax 150

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **Versatrax 100 (Figura 24)**



Figura 24. Versatrax 100

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **Nanomag (Figura 25)**



Figura 25. Nanomag

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

## **FABRICANTE ARIES**

- **TR2000 (Figura 26)**



Figura 26. TR2000

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **MINIBADGER (Figura 27)**



Figura 27. MINIBADGER

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **BADGER (Figura 28)**



Figura 28. BADGER

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

- **TITAN (Figura 29)**



Figura 29. TITAN

FUENTE: (Delgado, G. Daniel, 2008)

Los anteriores ejemplos son de varios robots disponibles en el mercado pero no son comunes. El robot para inspección de tubería más comercializado a nivel mundial son los ofrecidos por la empresa PANATEC pertenecientes a la serie de robots "ROVION" (Figura 30) cuya horquilla de costos varía entre los USD \$47000 y USD \$87000, esto sin contar los costos de transporte y demás aranceles necesarios para su importación, además de los extras o accesorios de los que depende su correcto funcionamiento. La empresa además ofrece equipos de segunda mano pertenecientes a la serie ROVER cuyos precios oscilan entre USD \$24000 y USD \$37000, sin mencionar todos los valores anteriormente mencionados.



Figura 30. Robot Serie ROVION

FUENTE: (Panatec, 2013)



## **CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA**

### **Metodología de Diseño**

La metodología de diseño seleccionada para el presente proyecto de grado es la norma alemana VDI 2221, la cual se desarrollará en el presente capítulo.

### **3.1. ETAPA 1. CLARIFICAR Y DEFINIR LA TAREA**

Se requiere diseñar un robot para inspección visual de tubería operado remotamente, para lo cual se investigó varios modelos de los robots en el mercado internacional dado que en el país no existen dispositivos comerciales como el propuesto. En su mayoría se definió las características del sistema robotizado utilizando el método de despliegue de la casa de la calidad o QFD.

#### **3.1.1. Método de Despliegue de la Casa de la Calidad (QFD)**

##### **3.1.1.1. Requerimientos de Cliente**

Se refirió para el presente proyecto de grado a los requerimientos del cliente que en este caso es el gerente de la empresa auspiciante la cual va a hacer uso del sistema robotizado en cuestión, para lo cual se realizó una entrevista al cliente. El resumen de la entrevista realizada se puede encontrar en el ANEXO A.

De la encuesta realizada se pudieron obtener los siguientes requerimientos del cliente o “Ques”:

Tabla 1. Requerimientos del Cliente

<b>N°</b>	<b>Requerimiento del Cliente</b>
1	PAN y TILT de la cámara
2	Robot de pequeñas dimensiones
3	Buena autonomía
4	Comunicación a gran distancia
5	Medir temperatura y presencia de gases
6	Control de velocidad del robot
7	Medición distancia recorrida
8	Sistema fácil de utilizar
9	Bajo Costo

### 3.1.1.2. Características Técnicas

Las características técnicas son las que se van a tomar en consideración para el diseño del sistema robotizado, además de ser seleccionadas para dar solución a los requerimientos de cliente.

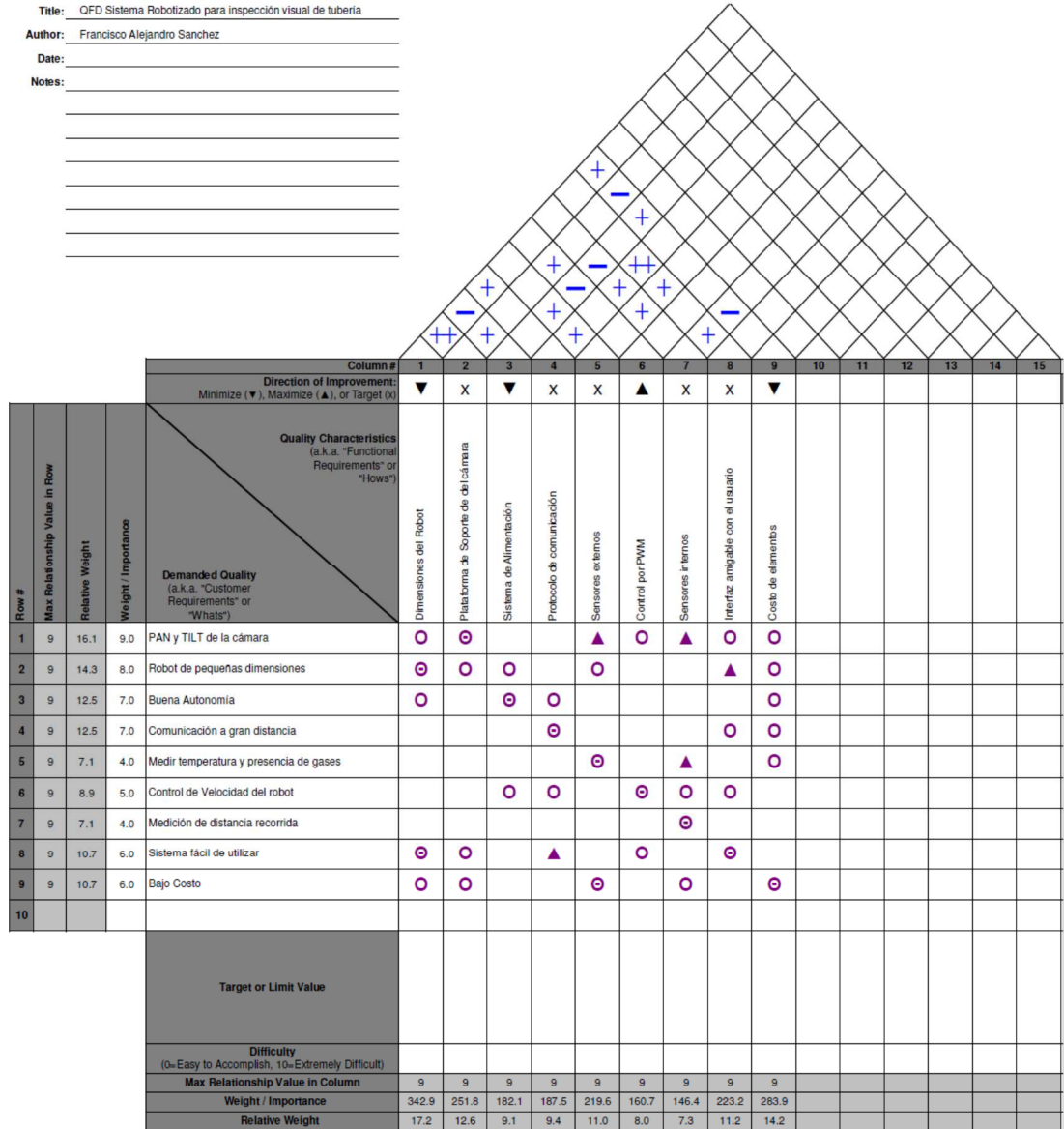
Tabla 2. Características Técnicas

<b>N°</b>	<b>Características Técnicas</b>
1	Dimensiones del Robot
2	Plataforma de soporte de la cámara.
3	Sistema de Alimentación
4	Protocolo de comunicación
5	Sensores Externos
6	Control por PWM
7	Sensores Internos
8	Interfaz Amigable con el Usuario
9	Costo de elementos

### 3.1.1.3. Desarrollo de la matriz casa de la calidad

Al obtener tanto los requerimientos de cliente como las características técnicas, los situamos en una matriz conocida como la casa de la calidad (Figura 31) en la cual se evaluará tanto la relación entre los parámetros mencionados y las interacciones relevantes entre las características técnicas.

Title: QFD Sistema Robotizado para inspección visual de tubería  
 Author: Francisco Alejandro Sanchez  
 Date:  
 Notes:



Legend		
⊙	Strong Relationship	9
○	Moderate Relationship	3
▲	Weak Relationship	1
++	Strong Positive Correlation	
+	Positive Correlation	
-	Negative Correlation	
▼	Strong Negative Correlation	
▼	Objective Is To Minimize	
▲	Objective Is To Maximize	
X	Objective Is To Hit Target	

Figura 31. Matriz QFD

### 3.1.1.4. Análisis de Resultados de la Matriz QFD

A continuación, (Ver tabla 3) se muestran las ponderaciones otorgadas a cada característica técnica observada en la matriz QFD:

Tabla 3. Resultados Matriz QFD

Orden de diseño	Característica Técnica	Porcentaje de Ponderación (%)
1	Dimensiones del Robot	17.2
2	Costo de elementos	14.2
3	Plataforma de soporte de la cámara.	12.6
4	Interfaz Amigable con el Usuario	11.2
5	Sensores Externos	11.0
6	Protocolo de comunicación	9.4
7	Sistema de Alimentación	9.1
8	Control por PWM	8.0
9	Sensores Internos	7.3

Al observar la tabla que reúne los datos concernientes a la matriz QFD podemos verificar que se le otorga principal relevancia a las dimensiones del robot, las cuales determinaran la movilidad del mismo dentro de la tubería que se va a inspeccionar.

Otro tópico importante es el costo de los elementos que como se conoce, si existen sistemas robotizados de estas características en el mercado pero a precios sumamente elevados por lo que el costo de los elementos sería una pieza clave en la construcción del mismo.

La cámara es un eje fundamental en la construcción del robot por lo tanto debe prestársele gran atención a la movilidad que presenta la misma ya que de esta depende que se cumplan los requerimientos del cliente.

Un requerimiento importante es la interfaz amigable con el usuario, esto permitiría que el sistema robotizado sea completamente utilizable en caso de que se requiera ser operado por otra persona aparte del diseñador.

Los sensores externos para medir la temperatura y la presencia de gas son requerimientos del cliente, pero que no muestran mayor dificultad tanto en implementación como en funcionamiento.

El protocolo de comunicación se basará en poder transmitir información a grandes distancias que permitan cubrir los rangos deseados por el cliente.

Un sistema de alimentación que logre incurrir en la autonomía necesaria para el robot es una necesidad básica.

El control por PWM es un modelo que permite controlar la velocidad tanto en motores como en múltiples actuadores que funcionen mediante energía, este tipo de control es el más utilizado para motores DC.

Los sensores internos básicamente serán encoders que permitan obtener medida de la distancia recorrida por el robot y que se vean reflejadas en la interfaz de comunicación con el usuario.

### **3.1.2. Tabla de Especificaciones**

Con los datos obtenidos en la matriz QFD y un análisis de las características técnicas, se pudo plantear las especificaciones del robot ubicadas en la tabla 4, estos datos se contrastan con los requerimientos del cliente:

Tabla 4. Especificaciones Técnicas

#	D/W	Característica	Valores
1	D	Largo	170mm - 250mm
2	D	Ancho	90mm - 120mm
3	D	Alto	90mm - 120mm
4	D	Peso	< 2 kg
5	D	Velocidad	0.1 m/s – 0.2 m/s
6	D	Distancia mínima de operación	36 m
7	D	PAN Cámara	360°
8	D	TILT Cámara	90°
9	D	Resolución Mínima	640x480 Pixeles.
10	D	Cuadros por segundo mínimos	30 fps.
11	D	Longitud de cable mínima	36 m
12	D	Tiempo de funcionamiento mínimo	1 Hora
13	D	Fuente de alimentación vehículo	12 v
14	D	Costo	< \$3000 USD.
15	D	Interfaz amigable con el usuario	
16	W	Buen Aspecto	
17	D	Fácil Reparación	
19	W	Bajo impacto ambiental	
20	D	Seguro	
21	D	Control manual y automático	

**Leyenda:****D:** Demanda**W:** Deseo

## 3.2. ETAPA 2. DETERMINAR LAS FUNCIONES Y SUS ESTRUCTURAS

### 3.2.1. Esquematización Funcional del Robot

La función principal del sistema se obtiene a partir de las entradas y salidas del sistema para la cual se usa el método de la caja negra, para el presente proyecto, ejemplificada en la figura 32.

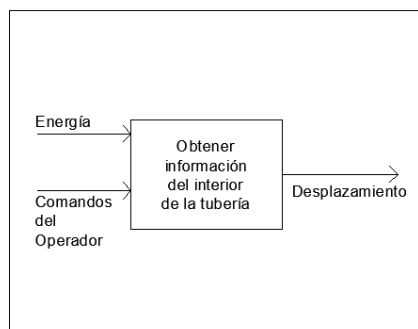


Figura 32. Diagrama de Caja Negra de la Función Principal.

### 3.2.2.. Identificación de las funciones Secundarias

Las funciones secundarias se ejemplifican en la figura 33.

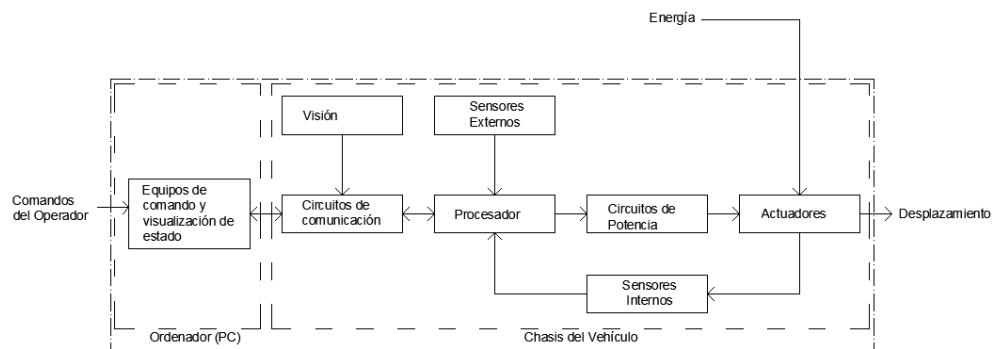


Figura 33. Diagrama de Funciones Secundarias

### **3.3. Etapa 3. BUSCAR LOS PRINCIPIO DE SOLUCIÓN Y SUS VARIANTES**

Siguiendo con la metodología de diseño, se propone realizar una matriz morfológica con las funciones que cumplirá el sistema robotizado, además de plantear soluciones para las mismas las cuales serán analizadas posteriormente para elegir la más adecuada y que cumpla con la función propuesta.

#### **3.3.1. Desarrollo de la Matriz Morfológica**

Una matriz morfológica es un arreglo de elementos, componentes o sub soluciones que pueden ser combinadas para así dar una solución general al proyecto de diseño planteado. El objetivo de una matriz morfológica es ampliar la búsqueda de posibles nuevas soluciones.

La metodología de diseño propone para este paso enfocarse en soluciones comerciales, las cuales sean de fácil acceso y que cumplan con las funciones deseadas y también restringir a la menor cantidad de sub-soluciones posibles porque de no hacerlo la cantidad de sub-soluciones se vuelven imposibles de manejar (Ver tabla 5).



Tabla 5. Matriz Morfológica de Soluciones

Sub-Funciones	Soluciones	
	1	2
<b>Equipos de Comando y Visualización de Estado</b>	Ordenador (PC)	
<b>Circuitos de Comunicación</b>	Comunicación mediante módulos Xbee	Comunicación por RS-485
<b>Microcontrolador</b>	Arduino Mega 2560	Arduino UNO Rev 3
<b>Actuadores</b>	Motor DC	Motor AC
<b>Circuitos de Potencia</b>	Driver motor DC con circuito integrado L298	Driver motor DC con circuito integrado L293
<b>Sensores Externos</b>	Sensor de temperatura LM35, humedad HIH-4030 y sensor de gas MQ-6	Sensor de temperatura y humedad DHT21 y sensor de gas MQ-9
<b>Sensores Internos</b>	Encoder por Software	Encoder de Cuadratura
<b>Visión</b>	Cámara de 720p CCV y plataforma	Cámara Boscam HD19 y plataforma
<b>Alimentación</b>	Baterías Níquel y Cadmio	Baterías de Polímero de Litio

### 3.3.2. Análisis de la Matriz Morfológica

#### 3.3.2.1. Equipos comando y visualización de estado

El sistema robotizado se basará en una interfaz programada en Labview por lo tanto en este caso el ordenador debe ser capaz de albergar dicho software, las características que debe tener el computador para trabajar con Labview normalmente bajo Windows se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Requerimientos Mínimos de Labview en Windows

<b>Windows</b>		
	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
<b>Procesador</b>	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
<b>RAM</b>	256 MB	1 GB
<b>Resolución de Pantalla</b>	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
<b>Sistema Operativo</b>	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)	Windows 8.1/8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)
<b>Espacio en Disco</b>	407 MB	3.5 GB (Incluye controladores predeterminados del DVD de Controladores de Dispositivos de NI)

FUENTE: (Labview, 2011)

### 3.3.2.2.Circuitos de Comunicación

#### Comunicación mediante módulos XBEE

Los circuitos de comunicación Xbee presentan un tipo de comunicación inalámbrica, sus principales características son:

- Buen Alcance: hasta 300ft (100 m) en línea vista para los módulos Xbee y hasta 1 milla (1.6 Km) para los módulos Xbee Pro.
- 9 entradas/salidas con entradas analógicas y digitales.
- Bajo consumo <50mA cuando están en funcionamiento y <10uA cuando están en modo sleep.
- Interfaz serial.
- 65,000 direcciones para cada uno de los 16 canales disponibles. Se pueden tener muchos de estos dispositivos en una misma red.
- Fáciles de integrar.

## **Comunicación por RS-485**

La comunicación RS-485 es un tipo de comunicación alámbrica, sus principales características se detallan a continuación:

- Interfaz diferencial
- Conexión multipunto
- Alimentación única de +5V
- Hasta 32 estaciones (ya existen interfaces que permiten conectar 256 estaciones)
- Velocidad máxima de 10 Mbit/s (a 12 metros)
- Longitud máxima de alcance de 1200 metros (a 100 kbit/s)
- Rango de bus de -7V a +12V

### **Selección de los circuitos de comunicación**

Podemos observar que los dos medios de comunicación analizados cumplen con las distancias necesarias de comunicación entre el operador y el vehículo de inspección.

Uno de las principales características del sistema robotizado es que este va a ser utilizado en un espacio confinado por un tubo de acero de 8 pulgadas, el cual repele todo tipo de señales enviadas mediante radiofrecuencia, esto ocasiona un problema para la comunicación mediante módulos Xbee ya que estos operan de mejor manera si existe una línea de aire directa entre los dos módulos que se desea comunicar, pero que no genera complicaciones para la comunicación RS-485 al ser un medio de transmisión por cable de hasta 1200 m, además de que en varios robots para inspección de tubería se verifico que utilizan protocolos de comunicación alámbrica.

De los datos recopilados y gracias al análisis previamente propuesto se eligió a la comunicación RS-485 como la ideal para el sistema robotizado.

### 3.3.2.3. Microcontrolador

El vehículo, parte del sistema robotizado, poseerá tecnología Arduino, se ha elegido este tipo de entorno de desarrollo gracias a su versatilidad y a la gran cantidad de información disponible, además de tratarse de un entorno de desarrollo completamente gratuito tanto en software como en hardware, ya que los diagramas eléctricos de las placas Arduino pueden encontrarse en internet. Esto presenta una gran cantidad de beneficios aparte de significar un ahorro en lo que se refiere a licencias de software original. Dicho esto, solo se debe elegir la placa Arduino que mejor se acople a las necesidades del proyecto.

Existen gran cantidad de placas Arduino en el mercado internacional, pero debido a restricciones como disponibilidad y facilidad de encontrar los módulos y shields propios de Arduino se ha restringido a dos opciones: Arduino Mega 2560 y Arduino Uno Rev3.

#### **Arduino Mega 2560**

Arduino Mega 2560 es uno de los entornos de desarrollo más completos que existen en el mercado, además de poseer un sistema robusto y muy confiable, algunas de sus características se detallan a continuación:

- 54 entrada/salida digitales, de los cuales 14 pueden ser usados como salidas PWM
- Posee 16 entradas analógicas
- Posee 4 puertos seriales por Hardware (UART)
- Un oscilador de cristal de 16 MHz
- Conector USB
- Un jack de poder
- Una conector ICSP
- Botón de Reset

## Características Técnicas:

Tabla 7. Características Técnicas Arduino Mega 2560

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB (of which 8 KB used by bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

## Arduino Uno Rev3

Arduino Uno es quizá la plataforma de desarrollo más utilizada principalmente entre estudiantes por su accesible precio, además de presentar todas las características que han hecho a Arduino uno de los mejores en el mercado, a continuación se detallan algunas de sus características principales:

- 14 entrada/salida digitales, de los cuales 6 pueden ser usados como salidas PWM
- Posee 6 entradas analógicas
- Los pin 0 y 1 pueden funcionar como RX y TX serial.
- Un oscilador de crystal de 16 MHz
- Conector USB
- Un jack de poder
- Una conector ICSP
- Botón de Reset

## Características Técnicas:

Tabla 8. Características Técnicas Arduino Uno Rev3

<b>Microcontroller</b>	<b>ATmega328</b>
<b>Operating Voltage</b>	5V
<b>Input Voltage (recommended)</b>	7-12 V
<b>Input Voltage (limits)</b>	6-20 V
<b>Digital I/O Pins</b>	14 (of which 6 provide PWM output)
<b>Analog Input Pins</b>	6
<b>DC Current per I/O Pin</b>	40 mA
<b>DC Current for 3.3V Pin</b>	50 mA
<b>Flash Memory</b>	32 KB (of which 0.5 KB used by bootloader)
<b>SRAM</b>	2 KB
<b>EEPROM</b>	1 KB
<b>Clock Speed</b>	16 MHz

## Selección del Microcontrolador

Para la selección del procesador para el presente proyecto se realizó una tabla comparativa (tabla 9) de las placas Arduino que se encuentran en el mercado, las de más fácil acceso ya que la metodología de diseño aconseja buscar alternativas comerciales.

Tabla 9. Tabla Comparativa Módulos Arduino

<b>Característica</b>	<b>Arduino Uno Rev3</b>	<b>Arduino Mega 2560</b>
<b>Micro controlador</b>	ATmega328P	ATmega2560
<b>Flash KiB</b>	32	256
<b>EEPROM KiB</b>	1	3
<b>SRAM KiB</b>	2	8
<b>Pines Digitales</b>	14	54
<b>Pines Digitales con PWM</b>	6	14
<b>Pines Analógicos</b>	6	16
<b>Interfaz USB</b>	ATmega8U2	ATmega8U2
<b>Dimensiones en mm</b>	68.8 mm x 53.3 mm	101.6 mm x 53.3 mm

Al observar la tabla 3.9 se puede verificar que la principal diferencia entre las placas radica en la memoria que poseen y en la cantidad de pines que manejan. Debido a que el proyecto se planea manejar gran cantidad

actuadores y sensores además de la cámara, iluminación y varios elementos más, esto sobrepasa la cantidad de pines que soporta el Arduino Uno Rev 3.

Otro punto importante a considerar es la memoria, en el Arduino Mega 2560 obtenemos mayor cantidad de memoria disponible lo que aporta una gran ventaja para el proyecto.

Después del análisis planteado y haciendo un balance de los beneficios y ventajas de cada una de las placas Arduino estudiadas, se decidió que para el presente proyecto se utilizará el Arduino Mega 2560 tanto por su cantidad de pines y por su capacidad de memoria.

#### **3.3.2.4. Actuadores**

Los actuadores son la parte fundamental del vehículo parte del sistema robotizado, para seleccionar los correctos se realizó un contraste entre motores AC y motores DC, donde se analizó las principales diferencias entre motores AC y DC, estas diferencias se encuentran resumidas en la tabla 3.10.

Tabla 10. Tabla Comparativa Motores AC y Motores DC

<b>MOTOR DC</b>	<b>MOTOR AC</b>
<b>La velocidad aumenta con la tensión aplicada, al disminuir la corriente del inducido y al disminuir el flujo producido por el campo inductor.</b>	Su velocidad depende de la corriente interna con que se lo alimenta.
<b>Regulación de velocidad de dos maneras: manteniendo constante el flujo y variando la tensión aplicada al inducido o manteniendo constante la tensión y variando el flujo de la excitación.</b>	Regulación de velocidad de giro mediante la alimentación por variadores electrónicos de frecuencia.
<b>Se pueden conectar en estrella o triángulo dependiendo de la tensión de la red.</b>	Dependiendo de cómo se conecte el devanado de excitación respecto al inducido se consiguen diferentes conexiones de motor: motor de excitación independiente, motor de excitación en derivación o shunt, motor de excitación en serie y motor de excitación compound.
<b>El par de motor es proporcional a la corriente del inducido y al flujo del campo magnético del inductor.</b>	El par depende del campo giratorio.
<b>Se usan mucho en la industria, sobretudo el motor trifásico asíncrono de jaula de ardilla.</b>	Suele utilizarse cuando se necesita precisión en la velocidad.
<b>Partes básicas: inductor, inducido y colector.</b>	Partes básicas: estator y rotor.
<b>Requieren de mayor mantenimiento al tener más piezas (escobillas, colector, etc)</b>	El mantenimiento requerido es mínimo.
<b>Diseño para multi-velocidad.</b>	Diseño para velocidad única.
<b>Alta relación peso/potencia.</b>	Baja relación peso/potencia.
<b>Mediano Costo.</b>	Bajo Costo.
<b>85% a 95% de eficiencia a carga completa.</b>	95% de eficiencia a carga completa.

### Selección de Actuadores

Al realizar un análisis de las diferencias (tabla 12) entre los motores AC y DC se decidió usar motores DC debido a su gran variedad en el mercado, ya que su prestaciones para robótica son varias y se encuentran en casi todos los sistemas de esta clase.

Un punto importante también que se tomó en cuenta es el sistema de alimentación el cual se basará en el uso baterías de Polímero de Litio debido



a la robustez que manejan y a la gran cantidad de carga que son capaces de almacenar, estas batería son de corriente continua por lo cual la elección será de motores DC. Entre los motores DC existen los principales tipos que son: motores con escobillas, servomotores y motores a pasos.

A continuación se realizó una comparación entre los tipos de motores DC disponibles en el mercado (Tabla 11) para así tomar una decisión más acertada acerca de los actuadores a utilizar:

Tabla 11. Tabla Comparativa Motores DC

Tipo de Motor	Característica		
	Precisión	Controlador	Precio
<b>Servomotor</b>	Alta	Tarjeta interna	Alto
<b>Motor DC</b>	Baja	Driver de motor DC	Bajo
<b>Motor a pasos</b>	Media	Driver motor a pasos	Medio

Al realizar un análisis comparativo de los diferentes motores DC, se tomó la decisión de usar motores con escobillas para el sistema de locomoción del vehículo parte del sistema robotizado porque para este no se necesita una precisión alta sino basta con que le permita al vehículo desplazarse siguiendo los lineamientos dispuestos por el operador.

Para la plataforma encargada de la cámara se usará servomotores al ser una tarea que requiere mayor precisión dado que cumplir los objetivos del mismo depende claramente de que la cámara cumpla su función al poder monitorear visualmente el interior de la tubería. Otro punto a tomar en cuenta es el tamaño de los mismos que ayudan a cumplir los objetivos del proyecto puesto que el driver interno que manejan optimiza espacio y al ya tener caja reductora interna de pequeñas dimensiones también mejoran el torque aprovechando el espacio.

La selección de motores DC de escobillas se realiza a continuación.

### Diagrama del Cuerpo Libre

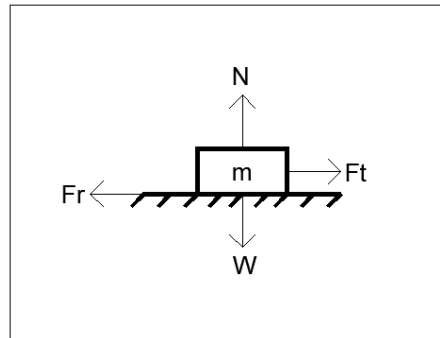


Figura 34. Diagrama del Cuerpo Libre

### Sumatoria de fuerzas en Y

$$\sum F_y = 0$$

$$N - W = 0$$

$$N = W$$

### Sumatoria de Fuerzas en X

$$\sum F_x = m * a$$

$$F_t - F_r = m * a$$

$$F_t - (\mu N) = m * a$$

$$F_t = m * a + \mu N$$

Después de analizar las ecuaciones obtenidas gracias al diagrama del cuerpo libre aproximado del modelo nos remitimos a obtener la fuerza, tomando en cuenta que el coeficiente de rozamiento entre caucho y sólidos varía entre 1 y 4, por lo que se usará el valor de 1 (Mecánica, 1982), dado que este valor presenta ser genérico ya que las tuberías de petróleo llevan distintos recubrimientos interiores que dependen de su futura utilización. La aceleración se la tomará de  $0.04 \text{ m/s}^2$  dado que no se requiere excesiva aceleración del robot, dado que se concluyó que el cliente desea que el robot pese menos de 2kg se tomará un valor de 1.5 kg para el cálculo.

$$Ft = 1.5 \text{ kg} * 0.04 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1 * 1.5 \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$Ft = 14.76 \text{ N} \approx 15 \text{ N}$$

Este valor se lo dividirá para 4 ya que se utilizarán 4 motores independientes para la locomoción del robot.

$$Fm = \frac{15 \text{ N}}{4}$$

$$Fm = 3.75 \text{ N}$$

Fm se notará como la fuerza necesaria que debe entregar cada motor.

El cálculo de potencia de los motores se relaciona directamente con la velocidad y el peso del robot, con estos datos disponibles calcularemos una potencia aproximada para así seleccionar el motor que más se acerca a nuestros requerimientos.

$$P = F * V$$

Donde:

P = Potencia.

F = Fuerza.

V = Velocidad.

Al obtener la fuerza necesaria se la reemplaza en el ecuación 1, como se especificó anteriormente la velocidad necesaria varía entre 0.1 m/s y 0.2 m/s, se usará el valor de 0.2 m/s para trabajar con la velocidad máxima.

$$P = 3.75 \text{ N} * 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 0.75 \text{ w}$$

Tomando en cuentas que los motores eléctricos son muy eficientes pero no completamente se tomará una eficiencia del 80% como alternativa, por lo que se aumentará la potencia en un 20% para evitar contratiempos.

$$P = 0.75 \text{ w} * 1.2$$

$$P = 0.9 \text{ w}$$

Con los datos obtenidos procedemos a calcular la velocidad angular del motor para así obtenida la potencia del mismo y la velocidad angular, lograr escoger el motor adecuado para el proyecto en cuestión.

$$\omega = \frac{V}{r}$$

$$\omega = \frac{0.2 \text{ m/s}}{0.02 \text{ m}}$$

$$\omega = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Transformando a revoluciones por minuto se obtiene:

$$\omega = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

$$\omega = 95.5 \text{ RPM}$$

Con los datos obtenidos de los cálculos se propone el motor: Micro Gear Motor marca Pololu (Figura 35)

### Características Técnicas

- Alimentación: 6 v
- Velocidad sin carga: 110 RPM
- Corriente sin carga: 70 mA
- Torque sin carga: 4.3 Kg/cm
- Relación de Transmisión: 250:1
- Potencia sin carga: 1.04 - 2.07
- Tamaño del motor: 26x12x10 mm
- Diámetro del eje: 3 mm
- Longitud del eje: 10 mm
- Peso: 17 g.



Figura 35. Micromotor Pololu

### 3.3.2.5. Circuitos de Potencia

Para elegir el circuito de potencia adecuado, debido a que se va a trabajar con cuatro motores DC, se realizó una tabla comparativa (Tabla 12) de los dos driver propuestos dado que son los comercialmente disponibles y que cumple con los requisitos para el proyecto.

Tabla 12. Tabla Comparativa Circuitos de Potencia

Característica	Driver con integrado L293	Driver con integrado L298
Voltaje máximo de alimentación	36 v	50 v
Voltaje de entrada máximo	7 v	7 v
Voltaje máximo de salida	36 v	50 v
Corriente pico máxima de salida	1 A	4 A
Máximo temperatura de trabajo	150 °C	130°C
Temperatura de Almacenamiento	-65°C – 150°C	-40°C – 150°C

### Selección Circuitos de Potencia

Los motores DC ocupan una gran cantidad de corriente para el arranque y debido a que se utilizarán 4 uno para cada rueda del vehículo de inspección, el driver necesita manejar valores muy altos, aproximadamente de 0.6 A por cada motor. Por lo que se utilizará el driver L298 para el vehículo de inspección además de que este presenta mayor robustez y confiabilidad.

### 3.3.2.6. Sensores Externos

Los sensores externos se basarán en dos funciones: registrar la temperatura del aire y registrar si existe presencia de gases dentro de la tubería a inspeccionar.

#### Sensor de temperatura

Para elegir el sensor adecuado se realizó una tabla comparativa (Tabla 13) de las principales características entre los sensores propuestos.

Tabla 13. Tabla Comparativa de Sensores de Temperatura

Característica	LM35	DHT21
Voltaje de alimentación	5 v	3.3 v – 5.5 v
Precisión	± 0.5 °C	± 1 °C
Señal de salida	Analógica	Digital
Rango temperatura medible	- 55 °C y 150 °C	- 40 °C y 80 °C

#### Sensor de gas

Existe gran cantidad de sensores de gas en el mercado pero como propuesta para el sistema robotizado se analizarán los siguientes cuyas principales características se analizan en la siguiente tabla comparativa (Tabla 14).

Tabla 14. Tabla Comparativa Sensores de Gas

Característica	MQ-6	MQ-9
Voltaje de alimentación	5 v	5 v
Gases a detectar	LPG, isobutano y propano	CO, gas inflamable, metano y propano
Resistencia de carga	10 Kohm	Ajustable
Concentración de Detección	200-10000 ppm LPG, isobutano y propano	10-1000 ppm CO y 100-10000 ppm gas inflamable

### **Selección de sensores externos**

El sensor LM35 es una buena opción pero el sensor DHT21 presenta mayores beneficios ya que además de ser un sensor de temperatura, también es un sensor de humedad obviando el uso del sensor HIH4030. Además de no necesitar circuitería adicional, ya que el sensor LM35 necesita adicionalmente un acondicionamiento de señal. Por lo tanto se elegiría al sensor DHT21 para que forme parte del sistema robotizado de inspección.

Para detectar la presencia de gases se basó la elección del sensor en el tipo de gases que existen en el ambiente petrolero por lo que se le dio principal importancia al sensor MQ-9 ya que este reconoce múltiples tipos de gases inflamables, lo cual es un punto determinante para su elección.

#### **3.3.2.7.Sensores Internos**

Esta etapa del proyecto se requiere cuantificar la distancia recorrida por el vehículo, para así obtener la ubicación del mismo dentro de la tubería. Además que permita identificar la ubicación de los desperfectos a identificarse dentro de la misma.

Para esta etapa se analizarán tres tipos de sensores internos que en este caso serán: encoder de cuadratura y encoder por software.

#### **Encoder de cuadratura**

El encoder de cuadratura es un codificador incremental que funciona a base de dos sensores ópticos posicionados a  $\frac{1}{4}$  de ranura de separación, esto genera dos señales de pulsos digitales desfasadas  $90^\circ$  o en cuadratura. Normalmente a estas señales se las denomina A y B. Con este tipo de codificación se puede monitorear variables como posición, velocidad y dirección.

## **Encoder por software**

Este tipo de encoder se basa en programación y puede ser realizado de varias maneras. La más utilizada en realizarlo mediante interrupciones, las cuales como sabemos se registran mediante un contador para después realizar un cálculo el cual permita una conversión entre interrupciones y distancia recorrida. Un segundo tipo es contabilizar el tiempo que el motor se encuentra funcionando y así almacenar este valor en una variable que permita después realizar un cálculo previo para mostrar la distancia recorrida.

Hay muchos tipos de encoders por software se nombró los más comunes. Manejar la medición de distancia de esta manera presenta un grave conflicto que se refiere a la exactitud de los datos ya que por muchas razones puede fallar cualquier elemento en la programación, afectará directamente al registro de la distancia recorrida.

## **Selección de Sensores Internos**

Debido a que se necesita cierta grado de exactitud para lograr ubicar al robot dentro de la tubería y más que todo para identificar la posición exacta de las posibles fallas a ubicarse se selecciona como alternativa viable el encoder de cuadratura porque este además de presentar mayor exactitud en los cálculos, provee una seguridad al estar directamente registrando los movimientos de las ruedas lo que asegura su funcionamiento para cumplir los objetivos previstos.

Para el presente proyecto se eligió un encoder de cuadratura marca Pololu, a continuación sus características técnicas



**Características Técnicas del encoder de cuadratura marca Pololu  
(Figura 36):**

- Voltaje de Operación: 4.5v y 5.5v
- Dos salidas digitales (de cuadratura)
- 14 mA de consumo de corriente a 5v
- Registra hasta 48 pulsos por revolución (resolución de 3 mm o 1/8 in)
- Tamaño pequeño
- Peso: 1.6 g

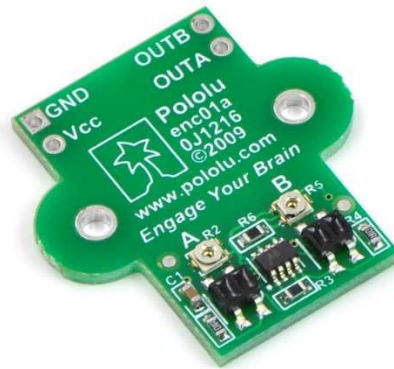


Figura 36. Encoder de Cuadratura Pololu

FUENTE: (POLOLU, 2014)

### 3.3.2.8. Visión

El sistema de visión se fundamentará en una plataforma capaz de permitir el PAN y TILT de la cámara para que a su vez esta pueda inspeccionar desperfectos dentro de la tubería. Con este objetivo se analizaron 2 sistemas de plataformas para cámaras de video y también las cámaras para los mismos, se realizó una tabla (Tabla 15) para mostrar los resultados.

Tabla 15. Tabla Comparativa de Sistemas de Visión

Característica	720p ccv cámara de video más plataforma	Boscam hd19 más plataforma
PAN	360°	360°
TILT	90°	180°
Lentes	F=2.8 mm, ángulo 170°	F=2.8 mm, ángulo 170°
Resolución máxima de video	1280x720, 30 fps	1920x1080 30 fps
Capacidad de memoria	-----	Micro SD Card de hasta 32 GB
Voltaje de entrada	12 v	12 v
Peso	50 g	70 g

### Selección del Sistema de Visión

Después de analizar la tabla 18 podemos ver que las características entre los sistemas de visión se utilizará el sistema de visión proporcionado por la cámara Boscam HD19 porque además de permitir un almacenamiento del video presenta las mejores características ya que su TILT es de 180° lo que amplifica su versatilidad de visión además de ser un sistema FPV (First Person View) utilizado mundialmente en aviones a control remoto, lo que garantiza su robustez como sistema de monitoreo de video. La resolución de la cámara también que es una de las más altas en el mercado es otra razón para su elección.

Un punto importante es la transmisión de video, esta se realizará mediante un sistema conocido como "Balun" de video el cual permite transmitir una señal analógica de video hasta 300 metros de distancia lo que satisface de sobremano los requerimientos para el proyecto.

#### 3.3.2.9. Alimentación

En lo referente a alimentación se analizó las dos alternativas disponibles en el mercado para baterías recargables de larga duración como son las baterías de Níquel y Cadmio (NiCd) y las baterías de Polímero de Litio (LiPo), la tabla 16, pueden observarse los resultados.

Tabla 16. Comparación Baterías NiCd y Baterías LiPo

Característica	Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	Polímero de Litio (Li-Po)
Voltaje por Célula	2 v	3.7 v
Ah	7 - 960	-
Potencia/Kilo	30 Wh/kg	100-130 Wh/Kg
Sobrecarga	No Soportado	Soportado
N° de Recargas	1000 aprox.	5000 aprox
T de descarga/mes	5%	6%
Tiempo de Carga	8-16 horas	1-1.5 horas

### Selección de la Alimentación

La batería de Polímero de Litio presenta mejores atributos en relación potencia/peso, número de recargas y sobre todo tiempo de carga, convirtiéndola en la mejor candidata para el presente proyecto porque se busca minimizar dimensiones para un mejor desempeño dentro de la tubería y más potencia por menor peso y volumen ocupado.

Para elegir la batería adecuada se recurre al siguiente cálculo

$$EB = I \times T$$

EB = Energía de la batería

I = Corriente Consumida promedio

T = Tiempo promedio de Operación

En promedio cada micromotor consume una potencia de 160 mA., al ser 4 motores los utilizados, obtenemos un valor de 640 mA., pero al no estar funcionando constantemente se toma un valor arbitrario del 50% de utilización entonces obtenemos un valor de 320 mA.

Reemplazando este valor para un promedio de 1 hora de funcionamiento obtenemos:

$$EB = 320 \text{ mA} \times 1 \text{ h}$$

$$EB = 320 \text{ mAh}$$

Las baterías disponibles en el mercado debido a restricciones en las importaciones son las baterías de Polímero de Litio de 2 celdas que proveen 7.4 v y una carga de 1300 mAh (Figura 37), más de lo necesario para el presente objetivo.



Figura 37. Batería LiPo

Para la regulación de voltaje tanto como para los motores que operan con 6 v y para la placa “Arduino Mega 2560” y “Arduino Sensor Shield” que trabajan con 5v se utilizó un módulo que integra el chip LM2596 con capacidad de proveer varios voltajes de salida y manipula corrientes de hasta 3A.

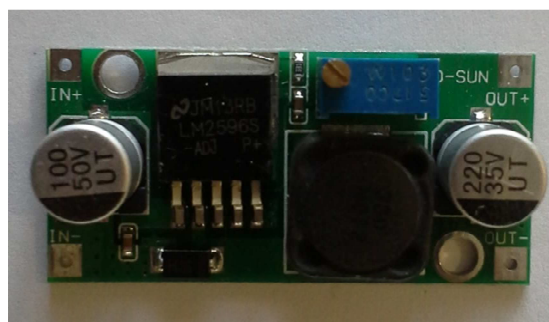


Figura 38. Regulador de Voltaje (LM2596)

De pasadas experiencias se pudo constatar que alimentar directamente el microcontrolador y los motores provoca varios problemas como un reseteo inesperado del microcontrolador o incluso llega hasta borrar la programación del mismo, por esta razón se usó una batería para alimentación de la placa

“Arduino” y del “Arduino Sensor Shield” (encargado de la alimentación de sensores y actuadores) y una segunda batería para la alimentación del driver L298 y los motores. Una tercera batería es necesaria debido a los requerimientos de la cámara la cual opera a 12 v.

### 3.3.3. Solución Principal

Tras el análisis realizado a cada aspecto de la matriz morfológica se selecciona, como nos dice la metodología de investigación escogida, los elementos adecuados para el modelo a evaluar en el proyecto (Tabla 17).

Tabla 17. Solución Principal

Sub-Funciones	Soluciones	
	1	2
<b>Equipos de Comando y Visualización de Estado</b>	Ordenador (PC)	
<b>Circuitos de Comunicación</b>	Comunicación mediante módulos Xbee	Comunicación por RS-485
<b>Procesador</b>	Arduino Mega 2560	Arduino UNO Rev 3
<b>Actuadores</b>	Motor DC	Motor AC
<b>Circuitos de Potencia</b>	Driver motor DC con circuito integrado L298	Driver motor DC con circuito integrado L293
<b>Sensores Externos</b>	Sensor de temperatura LM35 y sensor de gas MQ-6	Sensor de temperatura y humedad DHT21 y sensor de gas MQ-9
<b>Sensores Internos</b>	Encoder por Software	Encoder de Cuadratura
<b>Visión</b>	Cámara de 720p CCV y plataforma	Cámara Boscam HD19 y plataforma
<b>Alimentación</b>	Baterías Níquel y Cadmio	Baterías de Polímero de Litio

### **3.4. Etapa 4 Dividir en módulos realizables**

#### **3.4.1. Estructura de los módulos**

Para realizar de manera más ordenada, la metodología de diseño utilizada, recomienda dividir el diseño en módulos realizables, en este caso debido a que es un sistema mecatrónico se dividirá en 3 módulos principalmente:

##### **Módulo 1: Estructura mecánica**

- Plataforma Base
- Plataforma Superior
- Ensamble de Plataformas

##### **Módulo 2: Estructura electrónica**

- Diagrama del Circuito

##### **Módulo 3: Estructura de control**

- Diagrama de Flujo del sistema
- Control Manual
- Control Automático

### **3.5. Etapa 5: Desarrollar esquemas de los módulos principales**

#### **3.5.1. Módulo 1: Estructura mecánica**

Para definir la geometría de la estructura mecánica del vehículo de inspección, en este caso identificado como chasis del mismo se realizó un análisis de las dimensiones de los componentes a utilizarse los que se encuentran resumidos en la Tabla 18. También se verificó los requerimientos del cliente para que el

vehículo robotizado cumpla con la métrica anteriormente mencionada en las especificaciones del cliente.

Tabla 18. Dimensiones de Elementos a Utilizarse

#	Elemento	Métrica
1	Arduino Mega 2560	53.3 mm X 101.1 mm
2	Driver para motores con L298	43 mm X 43 mm X 30 mm
3	Arduino Mega Sensor Shield V2.2	53.3 mm X 101.1 mm
4	Módulo RS-485 to TTL	54mm X 18 mm
5	Baterías Li-PO 12 vdc	75 mm X 30 mm X 15 mm
6	Balun de Video	16 mm X 16 mm X 46 mm
7	Módulo de 2 Relés	50 mm X 40 mm X 20 mm
8	Regulador de voltaje de 6v dc	30 mm X 55 mm X 10 mm

#### 3.5.1.1. Plataforma Base

La plataforma base albergará dos de las baterías, el driver encargado del control de los motores de locomoción y los dos reguladores de voltaje. También posee los 4 soportes que sostendrán a los motores DC responsables del desplazamiento como se observa en la figura 39.

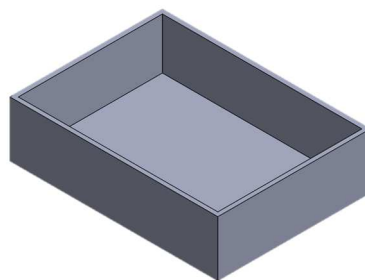


Figura 39. Esquema Plataforma Base

### 3.5.1.2. Plataforma Superior

La plataforma superior contiene los circuitos de control, comunicación, el sistema de visión y componentes requeridos para el correcto funcionamiento del robot, un diagrama de la misma se aprecia en la Figura 40.

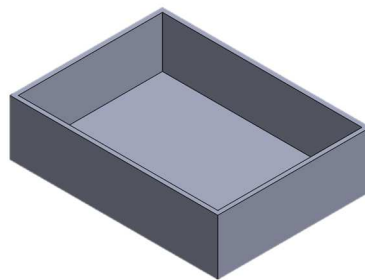


Figura 40. Esquema Plataforma Superior

### 3.5.1.3. Ensamblaje de Plataformas

El ensamblaje de la plataforma fija completa, unida la plataforma base a la plataforma superior se observa en la figura 41.

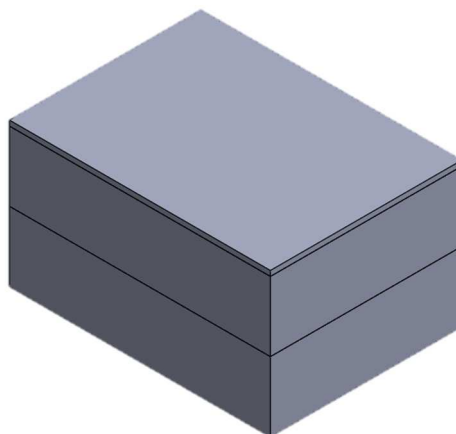


Figura 41. Ensamblaje Plataforma Base, Superior y Tapa



### 3.5.2. Módulo 2: Estructura Electrónica

#### 3.5.2.1. Diagrama del Circuito

El diagrama del circuito (Figura 42), es un esquema de las interconexiones presentes en el sistema robotizada para inspección de tubería.

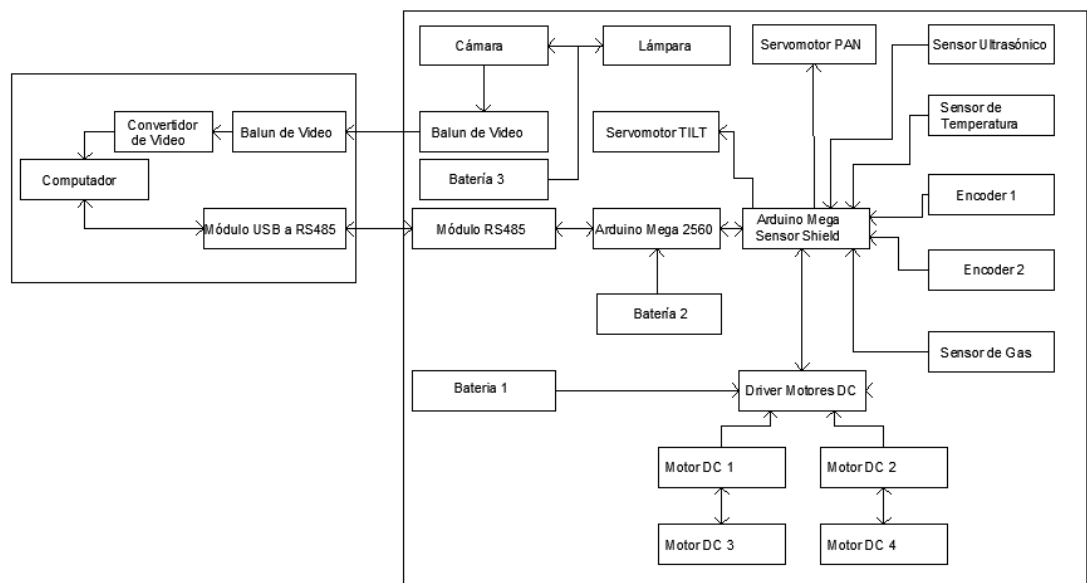


Figura 42. Diagrama del Circuito

### 3.5.3. Módulo 3: Estructura de Control

#### 3.5.3.1. Diagrama de Flujo del Sistema

En el siguiente diagrama de flujo se observa el comportamiento general del sistema (Ver Figura 43)

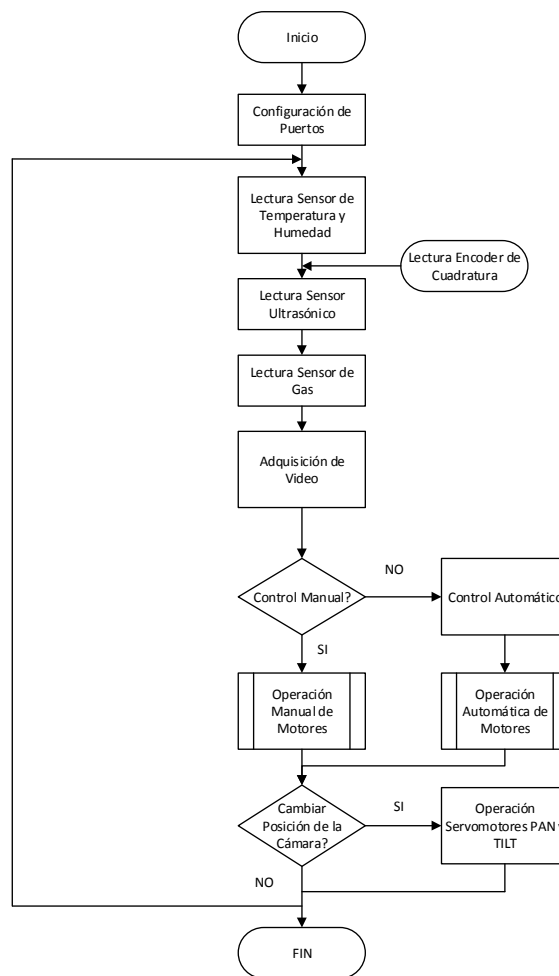


Figura 43. Diagrama de Flujo del Sistema Robótico

### 3.5.3.2. Control Manual

El control manual (Figura 44) basa su operación en manipular el driver de motores mediante sus entradas para que el robot para inspección avance, retroceda, gire a la izquierda y gire a la derecha. Todos estos desplazamientos son controlados por el operador a través del HMI.

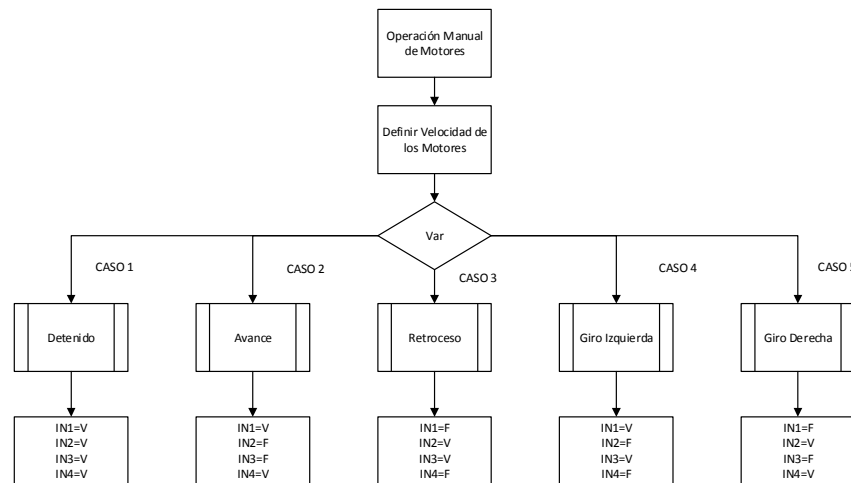


Figura 44. Diagrama de Bloques Control Manual

### 5.3.2. Control Automático

El control automático (Figura 45) está basado en un control ON-OFF, el cual analiza el valor obtenido por el sensor ultrasónico y lo comparará con un set-point, si este es menor detendrá el robot para inspección para evitar colisiones, caso contrario avanzará hasta que se cumpla la condición y se detenga.

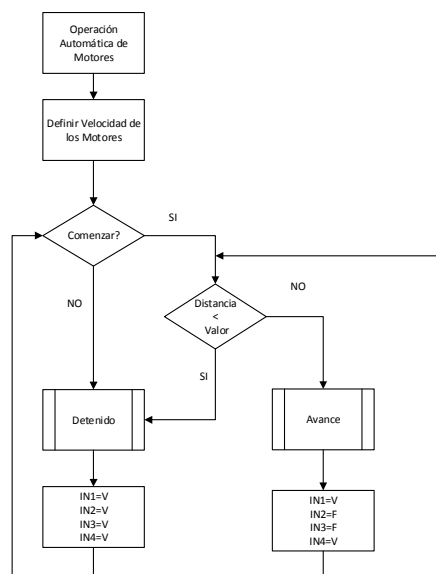


Figura 45. Diagrama de Bloques Control Automático

## 3.6. Etapa 6 Completar el esquema definitivo

### 3.6.1. Módulo 1: Estructura Mecánica

En la sección 3.5.1., se desarrolló la plataforma base y la plataforma superior como dos elementos aislados, apilados uno sobre otro sujetos mediante un tercero. Para mejorar el diseño y la resistencia mecánica, se optó por diseñar una plataforma base capaz de cubrir las dimensiones requeridas tanto en longitud, altura y profundidad.

La plataforma superior descansará sobre 4 pilares ubicados en cada esquina de la plataforma base aprovechando así el espacio y mejorando los atributos estéticos y funcionales del robot para inspección. Las esquinas de la plataforma también serán redondeadas para evitar concentradores de esfuerzos y aristas vivas.

#### 3.6.1.1. Plataforma Base

La plataforma base después de haber realizado los cambios mencionados se aprecia en la figura 46.

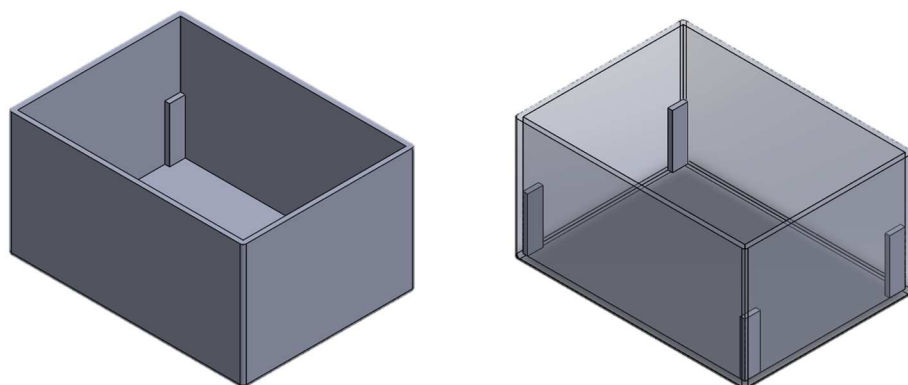


Figura 46. Plataforma Base

### 3.6.1.2. Plataforma Superior

La plataforma superior se optimizó colocando agarraderas en sus extremos para su mejor manipulación, logrando así una extracción más sencilla para facilitar el conexionado se realizaron dos ranuras transversales como se observa en la figura 47.

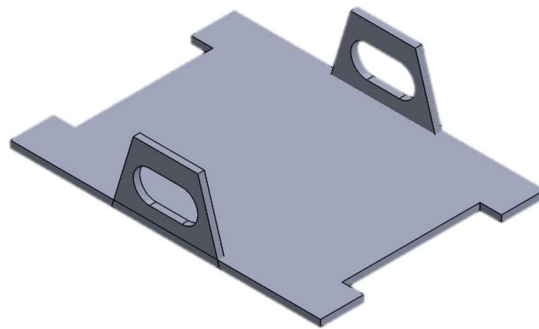


Figura 47. Plataforma Superior

### 6.1.3. Ensamblaje de Plataformas

El chasis ensamblado tomando en cuenta los cambios realizados en las dos plataformas se observa en la figura 48, los planos de las plataformas correspondientes pueden encontrarse en el ANEXO B y el ANEXO H.

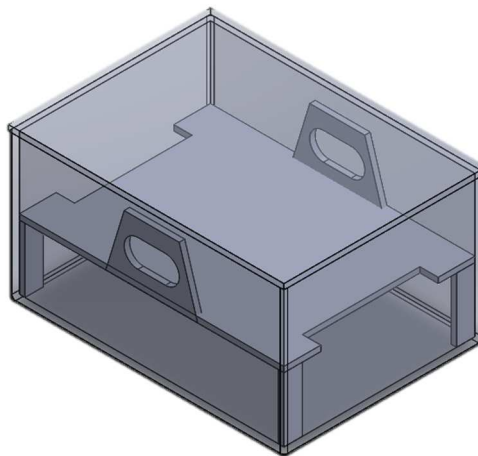


Figura 48. Ensamblaje de Plataformas.

### 3.6.2. Módulo 2: Estructura Electrónica

La estructura electrónica no sufrió modificaciones pero a continuación se listarán los pines de conexionado entre los distintos elementos del sistema. Para una optimización de espacio se utilizó el “Arduino Mega Sensor Shield”, capaz de recibir alimentación externa y específicamente diseñado para simplificar la conexión de elementos externos con el “Arduino Mega 2560” (ver figura 49).

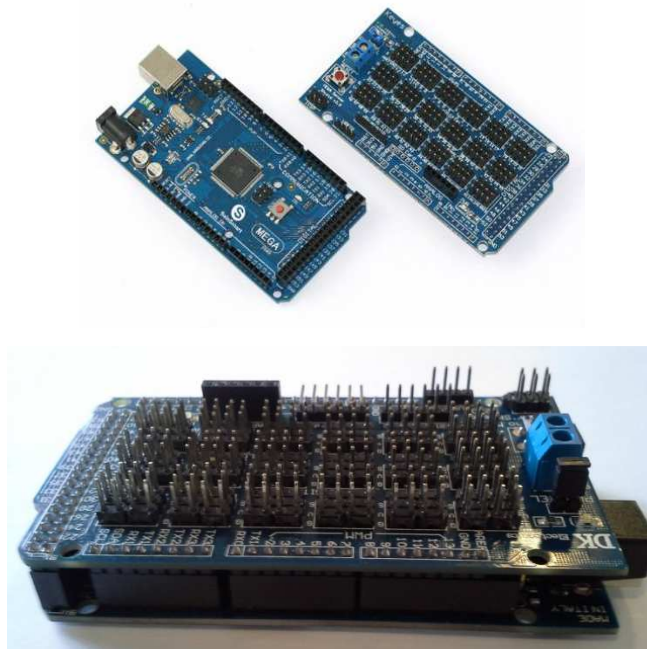


Figura 49. Arduino Mega 2560 y su ensamble con el Arduino Sensor Shield

Para el control de los motores DC encargados de la locomoción del robot se utilizó un driver L298 presente en la figura 50.

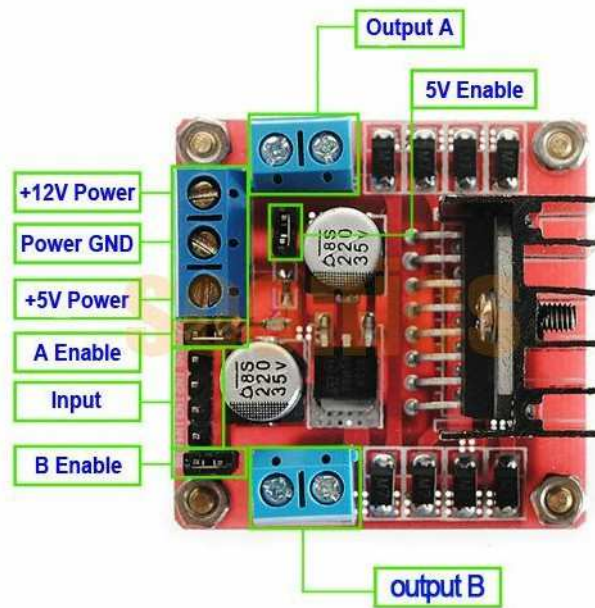


Figura 50. Drives L298

Los motores se conectan en paralelo, de dos en dos, para así poder controlarlos con el driver L298. La primera pareja de motores se conecta al OUTPUT A y la segunda pareja de motores al OUTPUT B. Los pines 12 v son encargados de recibir la alimentación, debido a las características de los motores solo se lo alimenta con 6 v.

Los pines conectados el “Arduino Mega Sensor Shield” quedan descritos en la tabla 19.

Tabla 19. Pines L298 conectados al Arduino Sensor Shield

Pin Driver L298	Pin Arduino Mega Sensor Shield
<b>EN A</b>	10 (PWM)
<b>EN B</b>	11 (PWM)
<b>IN 1</b>	30
<b>IN 2</b>	31
<b>IN 3</b>	32
<b>IN 4</b>	33

Para activar y desactivar las luces se utilizó un Relé de 5 VDC mostrado en la figura 51, el cual cumple una función de switch al prender y apagar las luces según sea comandado por el operador. Para el sistema de luces se construyó una pequeña placa que utiliza leds de alta intensidad para la iluminación dentro de la tubería presente la figura 52. La tabla 20, tiene referidos los pines de interconexión para los elementos citados.



Figura 51. Relé 5VDC



Figura 52. Leds de Iluminación

Tabla 20. Pines Relé 5 VDC Conectados al Arduino Sensor Shield

Pin Relé 5VDC	Pin Arduino Mega Sensor Shield
IN 1	52



Para lograr establecer una comunicación RS-485 entre el ordenador y el robot de inspección, se construyó dos placas con el integrado SN75179B, capaces de otorgar comunicación diferencial, las dos placas son iguales y una de estas se observa en la figura 53. En la tabla 21, se detalla el conexionado de pines entre ordenador, placas y robot.

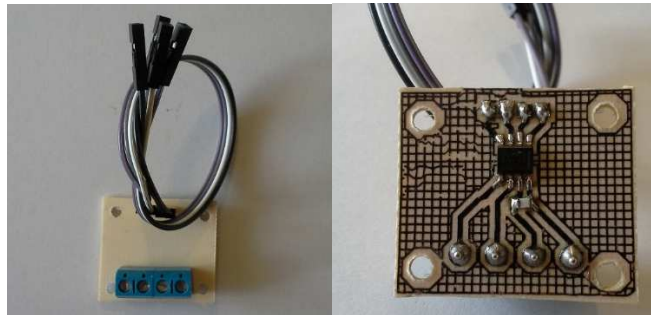


Figura 53. Placa para Comunicación RS-485

Tabla 21. Pines SN75179B Conectados al Arduino Sensor Shield

Pin Módulo 1 RS-485 Robot Móvil	Pin Módulo 2 RS-485 Comunicación PC	Pin Arduino Mega Sensor Shield
8 (A)	8 (A)	
7 (B)	7 (B)	
6 (Z)	6 (Z)	
5 (Y)	5 (Y)	
2 (R)		0 (RX0)
3 (D)		1 (TX0)

La medición de temperatura y humedad se encuentra a cargo del sensor DHT21, basado en comunicación “OneWire” (véase figura 54). La tabla 22 muestra los pines de conexión al “Arduino Sensor Shield.

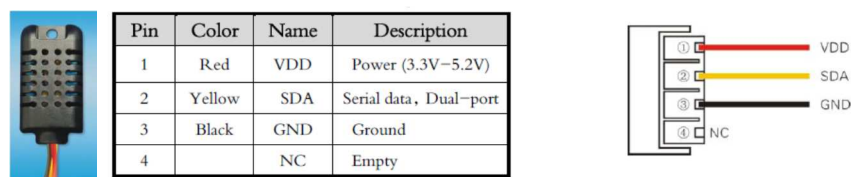


Figura 54. Sensor DHT21

Tabla 22. Pines DHT21 Conectados al Arduino Sensor Shield

DHT 21	Pin Arduino Mega Sensor Shield
Cable Amarillo (Señal)	34

La detección de gases inflamables se la realiza a través de un módulo especialmente diseñado para el sensor de gas MQ-9 (Figura 55). La tabla 23 muestra el conexionado de pines con el “Arduino Mega Sensor Shield”.

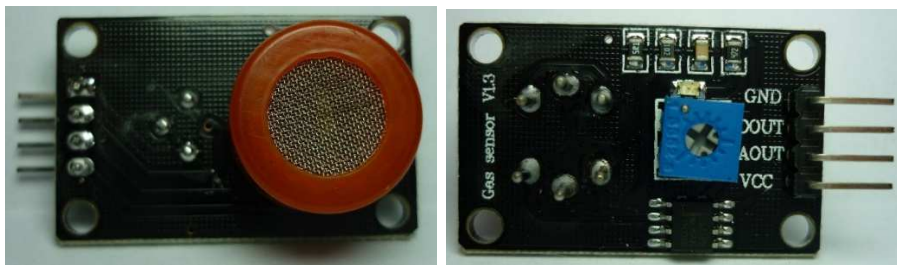


Figura 55. Módulo Sensor MQ-9

Tabla 23. Pines Módulo MQ-9 Conectados al Arduino Sensor Shield

Módulo MQ-9	Pin Arduino Mega Sensor Shield
AOUT	A0 (ADC)

El sensor ultrasónico (HC-SR04 figura 56) encargado de detectar obstáculos frente al robot para inspección, además de ser un eje fundamental en el control automático está conectado de la siguiente manera. Los pines de Interconexión se encuentran en la tabla 24.



Figura 56. Sensor HC-SR04

Tabla 24. Pines Sensor HC-SR04 Conectados al Arduino Sensor Shield

Pin Sensor HC-SR04	Pin Arduino Mega Sensor Shield
Trigger	44
Echo	45

Para la medición de la distancia recorrida por el robot se utilizó encoders de cuadratura (Figura 57). Se utiliza dos encoders por varias razones, en caso de falla de uno de ellos, para obtener un promedio de distancia gracias a los dos y por su forma de montaje para mantener hegemonía en el diseño. En la tabla 25, se aprecia sus pines de interconexión con el “Arduino Sensor Shield”.

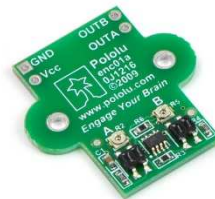


Figura 57. Encoder de Cuadratura Marca Pololu

Tabla 25 Pines Encoder Conectador al Arduino Sensor Shield.

Número de Encoder	Pin Encoder	Pin Arduino Mega Sensor Shield
1	OUTA	18
	OUTB	19
2	OUTA	21
	OUTB	20

### 3.6.2.1. Conexión General Pines “Arduino Mega 2560”

A continuación en la tabla 26, se resumen los pines de conexión entre el “Arduino Mega Sensor Shield” y los distintos elementos tratados previamente.

Tabla 26. Conexionado General de Pines Arduino Sensor Shield

Pin Arduino Mega Sensor Shield	Elemento Conectado
10 (PWM)	Enable A L298
11 (PWM)	Enable B L298
30	IN 1 L298
31	IN 2 L298
32	IN 3 L298
33	IN 4 L298
52	IN 1 Relé 5 VDC
0 (RX0)	2 (R) SN75179B
1 (RX1)	3 (D)
34	Cable de Señal DHT21
A0 (ADC)	AOUT Módulo MQ-9
44	Trigger HC-SR04
45	Echo HC-SR04
18	OUTA Encoder 1
19	OUTB Encoder 1
20	OUTB Encoder 2
21	OUTA Encoder 2

De esta manera se conectarán los diferentes elementos del sistema al “Arduino Mega 2560”, se mantiene la misma configuración planteada en el apartado 3.5.2.1., perteneciente a la etapa anterior de diseño. Su diseño final puede observarse en el Anexo G.

### 3.6.3. Módulo 3: Estructura de Control

#### 3.6.3.1. Diagrama de Bloques en Labview del Sistema

Después de un análisis previo del diagrama de flujo del sistema, se programa en “Labview” los aspectos necesarios para el desempeño del robot para inspección. El “Arduino Toolkit” utilizado para el desarrollo del presente proyecto contiene un archivo denominado LIFA\_Base. Este debe ser descargado en el “Arduino Mega 2560” para lograr utilizar todas las funcionalidades del sistema integrado Labview-Arduino.

“Labview” es un entorno de programación gráfico como se observará a continuación.

## Configuración de Puertos

En la figura 58, se observa la programación gráfica en “Labview” para la configuración de puertos necesarios para el control del proyecto. Se configuran tanto entradas como salidas, digitales y analógicas. Los últimos tres bloques están encargados de crear el arreglo para el número de servos a utilizarse y asignar un servo a cada miembro del arreglo creado de acuerdo a los pines en los que se conectan.

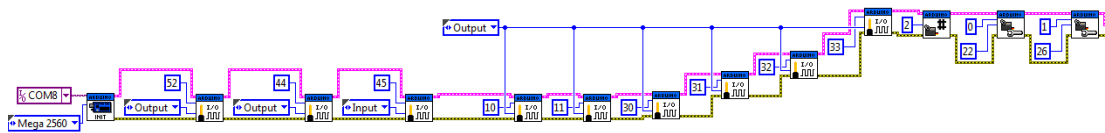


Figura 58. Configuración de Puertos en Labview

## Lectura del Sensor de Temperatura y Humedad

La obtención de valores de temperatura y humedad se realiza mediante un sensor DHT21 y el bloque detallado en la figura 59, para su programación basta con ingresar el pin al que se encuentra conectada la señal del sensor, el resto solo certificar que la comunicación sea exitosa y muestra los valores en los indicadores correspondientes.

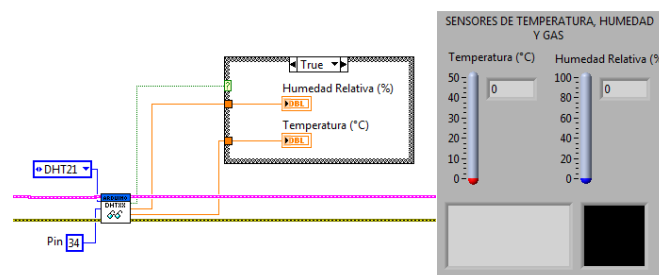


Figura 59. Sensor DHT21 Labview

## Lectura del Encoder de Cuadratura

Por la naturaleza del encoder este se lo programa como interrupción por hardware. Como se muestra en la figura 60, la cual ejemplifica su bloque correspondiente, calcula la distancia recorrida mediante el uso de la variable "COUNT". Además se programó un botón de RESET que permite inicializar desde 0 en cualquier momento la distancia medida por el encoder, para mediciones más exactas. Existen dos encoders los cuales se pueden activar según necesidad del usuario.

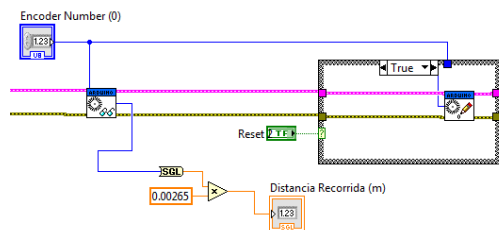


Figura 60. Encoder de Cuadratura Labview

Para mostrar el valor medido en metros se realizó una multiplicación por una constante, la misma que fue calculada mediante experimentación. El valor se ve expresado en la HMI (Figura 61).

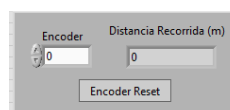


Figura 61. Encoder de Cuadratura HMI

## Lectura Sensor Ultrasonico

El Sensor HC-SR04 se lo programa como se muestra en la figura 62. El diagrama en bloque requiere el ingreso del número de pines donde se encuentran conectado el TRIGGER y ECHO, parte del sensor y entrega la distancia medida en cm.

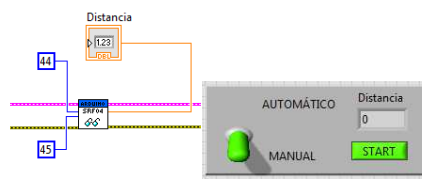


Figura 62. Sensor HC-SR04 Labview

### Lectura del Sensor de Gas

El módulo MQ-9 entrega una señal analógica por lo tanto se utiliza el convertidor analógico digital presente en el “Arduino” para obtener un valor, este se lo compara con un valor obtenido experimentalmente para detectar así la presencia de gases inflamables en el ambiente, a su vez si detecta gases el cuadro se vuelve rojo y da un mensaje de alarma, caso contrario el cuadro es de color verde y muestra un mensaje donde se reitera el hecho que no existen gases inflamables (Ver figura 63).

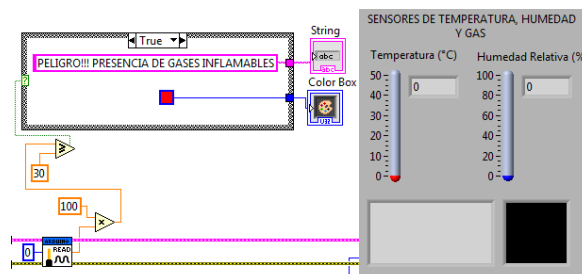


Figura 63. Sensor MQ-9 Labview

### Adquisición de Video

“Labview” posee el toolkit “Vision Acquisition”, a su vez el Vi delegado para la configuración y utilización del mismo. Al utilizarlo basta con escoger la cámara a utilizarse, calidad del video requerida y si se desea un solo fotogramas, varios o continuo dependiendo de la aplicación. En la figura 64, observamos el bloque del Vi “Vision Acquisition” y la pantalla de salida del HMI.

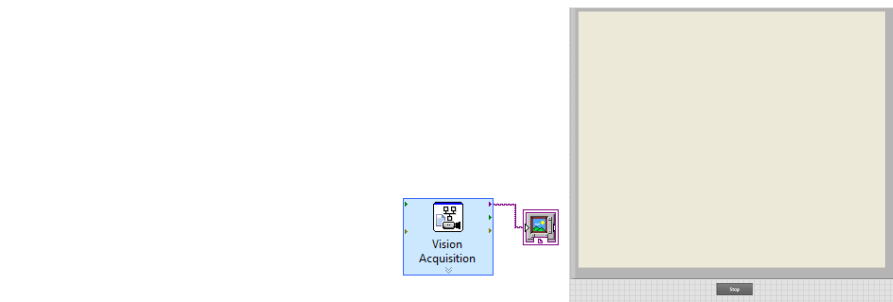


Figura 64. Adquisición de Video Labview

### Control Manual y Automático

Por defecto el mando esta seleccionado como manual figura 65, pero puede cambiar a un control automático si se requiere, estos controles se los explicarán a continuación.



Figura 65. Control Manual/Automático Labview

#### 6.3.2. Control Manual en Labview del Sistema

La figura 66., muestra el control manual, se observa que para hacer uso del mismo el switch control debe estar en la posición manual, por defecto se observa esto en el HMI, caso contrario debe cambiarse de posición del mismo para su control automático.

Para dar la dirección de trayectoria al robot se envía señales al driver L298 quien se encarga de entregar energía a los motores de acuerdo a los comandos enviados por Labview.

En este caso el control manual es operado por cuatro botones: avance, retroceso, giro izquierda y giro derecha. La velocidad de los motores es controlada por PWM mediante una perilla virtual que por defecto empieza en



el valor más bajo, representado por el color verde y valor más alto, representado por el color rojo.

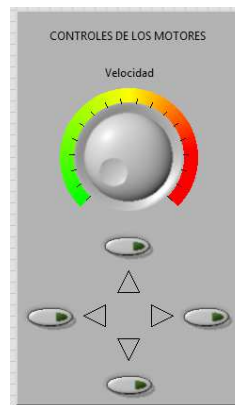


Figura 66. Control de Motores Labview

El control manual por defecto como se observa en la figura 67, empieza en parado, los elementos encerrados en el cuadro rojo se encargan de crear el arreglo capaz de albergar las distintas opciones para la estructura “case” encargada de modificar el comportamiento de los motores.

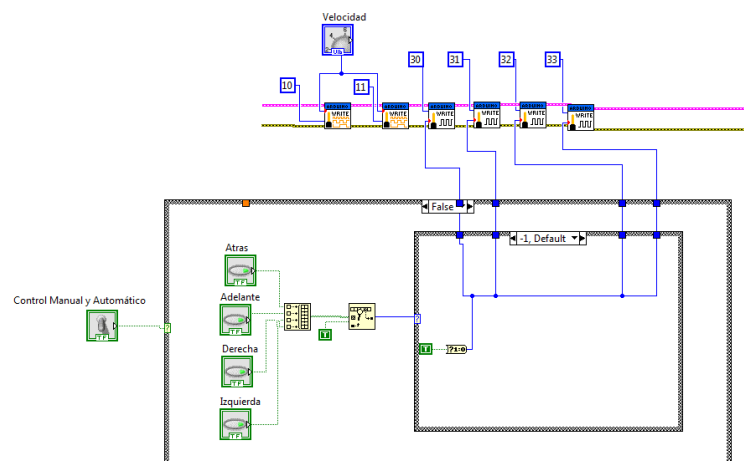


Figura 67. Control Manual Diagrama de Bloques Labview

En la 68, se observa la configuración necesaria para el retroceso de los motores, “caso 0”, avance, “caso 1”, giro derecha “caso 2” y giro izquierda “caso 3”. Los casos guardan la misma estructura presentada el apartado 3.5.3.2., pero en este caso ya se presenta la programación necesaria para su correcto funcionamiento en “Labview”.

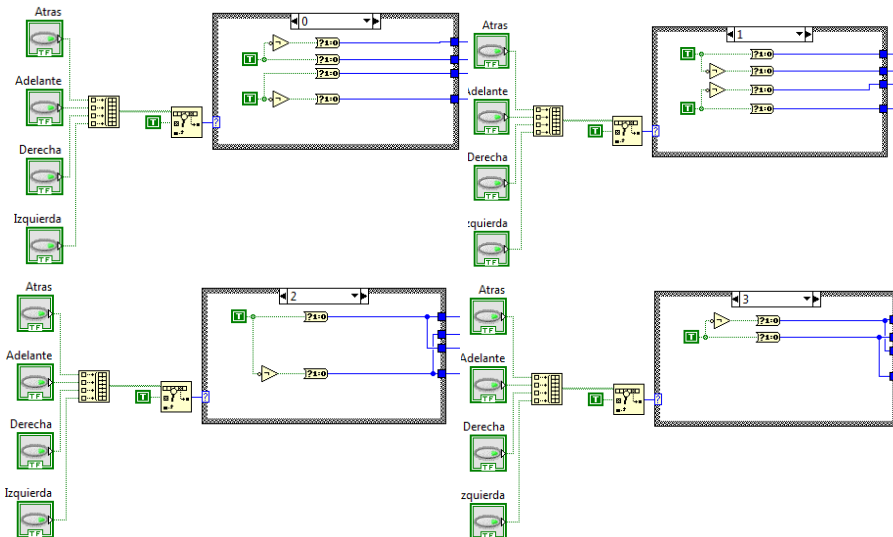


Figura 68. Diagrama de Bloques Casos en Labview

### 6.3.3. Control Automático

El control automático se basa en un control ON-OFF, el cual se selecciona mediante un switch, pero su activación depende de un botón de “START”, el cual genera que comience el bucle de control en el cual se toma la distancia reconocida por el sensor ultrasónico y a esta se la compara con un valor obtenido experimentalmente, si el valor del sensor ultrasónico es mayor o igual al valor de comparación, se detiene el avance del robot, caso contrario continua hasta que se cumpla la condición. Para detener el control automático se debe presionar el botón rojo de “STOP” y cambiar de posición al switch selector de control para volver a utilizar el control manual porque este se desactiva mientras esta encendido el control automático. El diagrama de bloques programado en la interfaz gráfica “Labview” se observa en la figura 69.

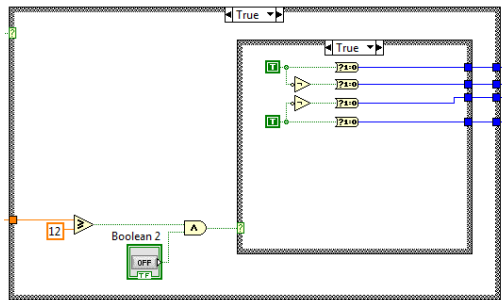


Figura 69. Control Automático Labview

Un diagrama completo de la programación puede observarse en el Anexo I.

### 3.7. Etapa 7: Preparar las instrucciones de operación y de producción

La etapa 7 según la metodología utilizada propone tres aspectos fundamentales:

- Construcción de un prototipo para pruebas
- Elaborar un manual de usuario
- Realizar la documentación del proyecto

La construcción del prototipo para pruebas, puede hallarse su detallada información en el capítulo 4 y su posterior evaluación en el capítulo 5. El manual de usuario se encuentra en el Anexo C y la documentación constituiría el documento escrito referente al proyecto de grado desarrollado.

## **CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA**

El presente capítulo explicará el proceso de fabricación del robot para inspección de tubería. Cabe destacar que debido a su condición de prototipo se lo construyó enteramente en material acrílico por su facilidad de modificación y gran variedad de aplicaciones.

De manera global el capítulo tratará los siguientes aspectos:

- Cambios realizados
- Diseño del proceso de construcción del robot para inspección de tubería
- Proceso ilustrado de construcción
- Resultado final

### **4.1. CAMBIOS REALIZADOS AL ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA**

Se realizaron tres cambios fundamentales, estos mejoran de la maniobrabilidad y funcionabilidad proporcionada por el robot.

El primer cambio se basa en la tracción, la cual se pretendía sea trasera con un eje de dirección delantero que permita manipular trayectoria a seguir por el robot, pero se empleó una tracción en las 4 ruedas conocida como "SKIDROW" por su mayor maniobrabilidad en ambientes confinados y mayor torque al usar un motor por cada rueda.

El segundo cambio es el montaje y la cámara a utilizarse, originalmente se pretendía usar una cámara FPV 720p de alta definición y su montaje, pero después de un análisis de posibilidades finalmente se usó una cámara BOSCAM HD19 con su respectiva estructura de montaje (superior capacidad de PAN y TILT), por su mayor desempeño bajo los requerimientos planteados.

Además la cámara BOSCAM HD19 permite grabar video internamente para su posterior análisis a diferencia de la otra opción propuesta justificando así su mayor costo.

El tercer y último cambio fueron las dimensiones del robot, porque después de varios ensayos (5 chasis e prueba) y simulaciones se alteraron las mismas para lograr la mejor distribución de componentes, mayor movilidad y prestaciones del robot.

#### **4.2. DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN**

Basado en un diagrama de bloques (ilustrado en la figura 70) el cual explicará la correlación entre los diferentes procesos y elementos involucrados en el proceso de construcción.

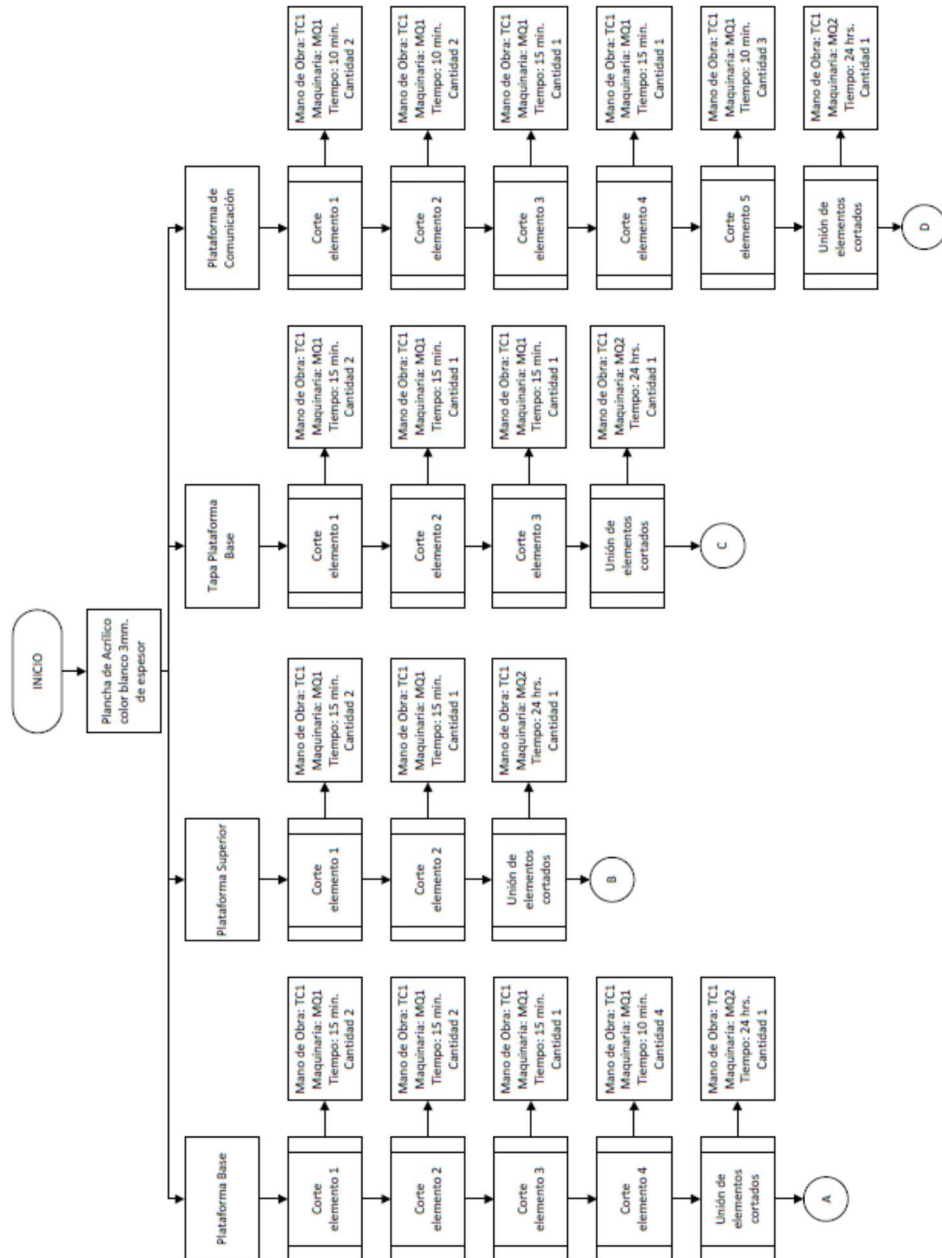


Figura 70. Diagrama del Proceso de Construcción (1 de 3)

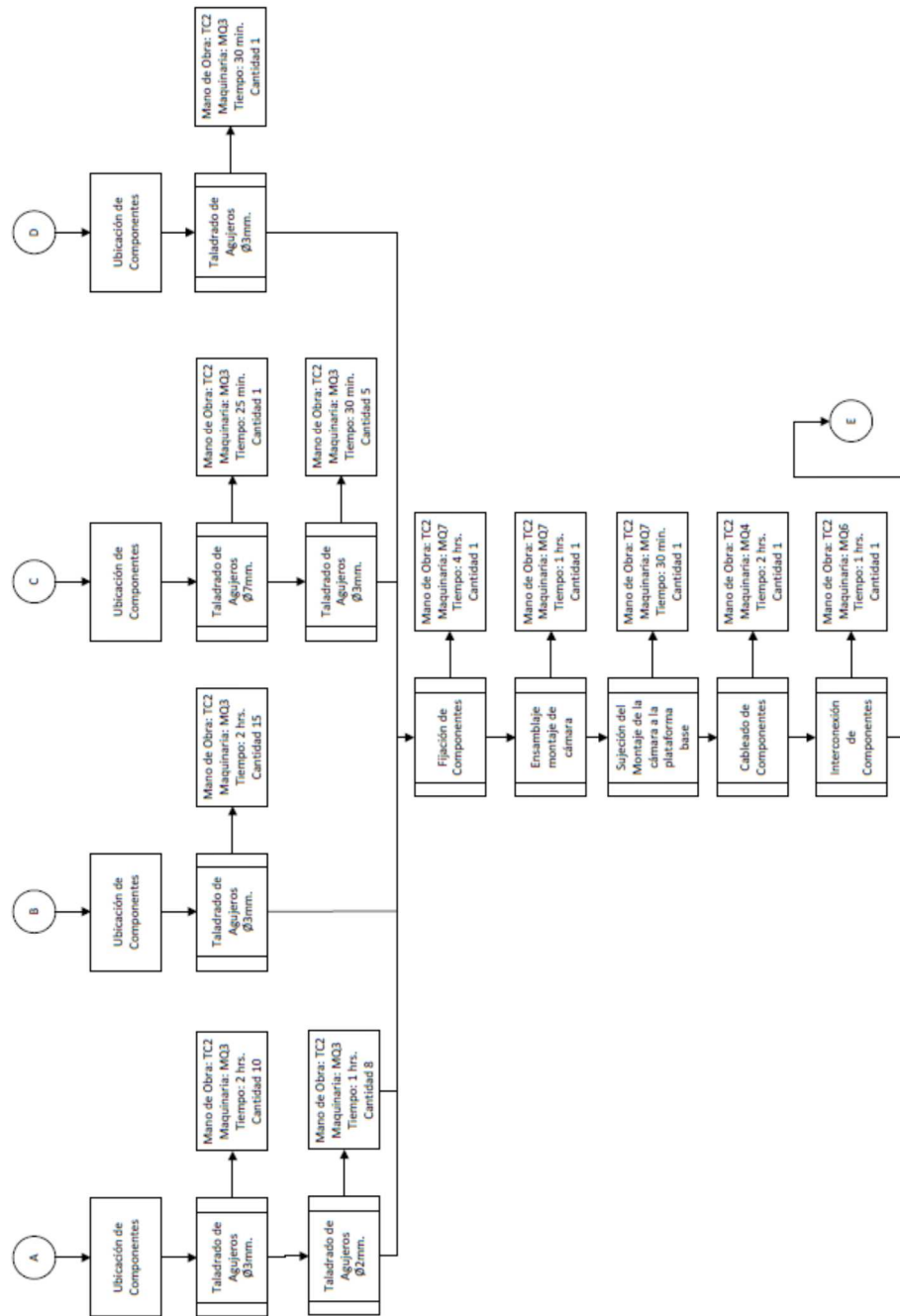


Figura 4.1. Diagrama del Proceso de Construcción (2 de 3)

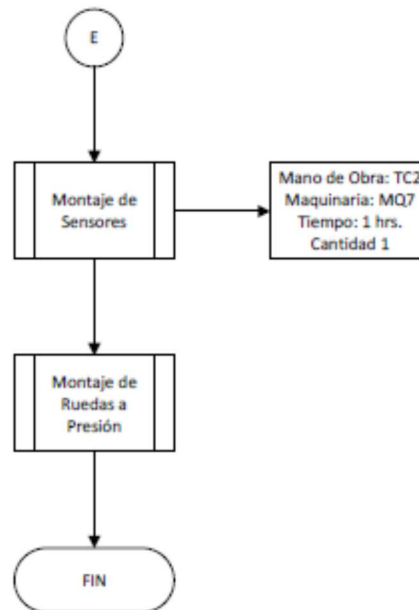


Figura 4.1. Diagrama del Proceso de Construcción (2 de 3)

Tabla 27. Leyenda del Diagrama de Construcción

Código	Descripción
TC1	Técnico de trabajo en acrílico
TC2	Técnico
MQ1	Cortadora Laser
MQ2	Aplicador de aglutinante (acrílico)
MQ3	Taladro
MQ4	Soldador eléctrico (Cautín)
MQ5	Aplicador de Silicón
MQ6	Pinzas
MQ7	Destornillador



### 4.3. PROCESO ILUSTRADO DE CONSTRUCCIÓN

#### 4.3.1. Corte y Ensamblaje de Plataformas

Para la construcción del chasis se utilizó corte por láser basado en un sistema CAD/CAM, en el cual se ingresó el diseño de las partes en el software “Autocad” y la máquina CNC se encargó de transformar dichos datos a lenguaje de máquina para obtener el resultado esperado, con este propósito se recurrió a la empresa ACRIPLAX quienes disponen de la máquina: “CO2 Laser Engraving Cutting Machine (FL1490)” ilustrada en la figura 71, especialmente diseñada para el trabajo en acrílico, madera y cuero, con las siguientes características:



Figura 71. Cortador Láser FL1490

**Información Básica:**

No. de Modelo: FL1490

Tipo de la máquina de grabado: Máquina de Grabado Láser

Tipo de Control: CNC

Corriente: C.A.

Tipo de Láser: CO2

**Información Adicional:**

Marca: FLYING

Embalaje: Plywood

Estándar: CE

Origen: China

Capacidad de Producción: 300PC/Month

Después de obtener las partes provenientes del sistema CAD/CAM se los ensambla mediante un pegamento importado para obtener la forma deseada, como resultado se logró los siguientes elementos visibles en la figura 72:

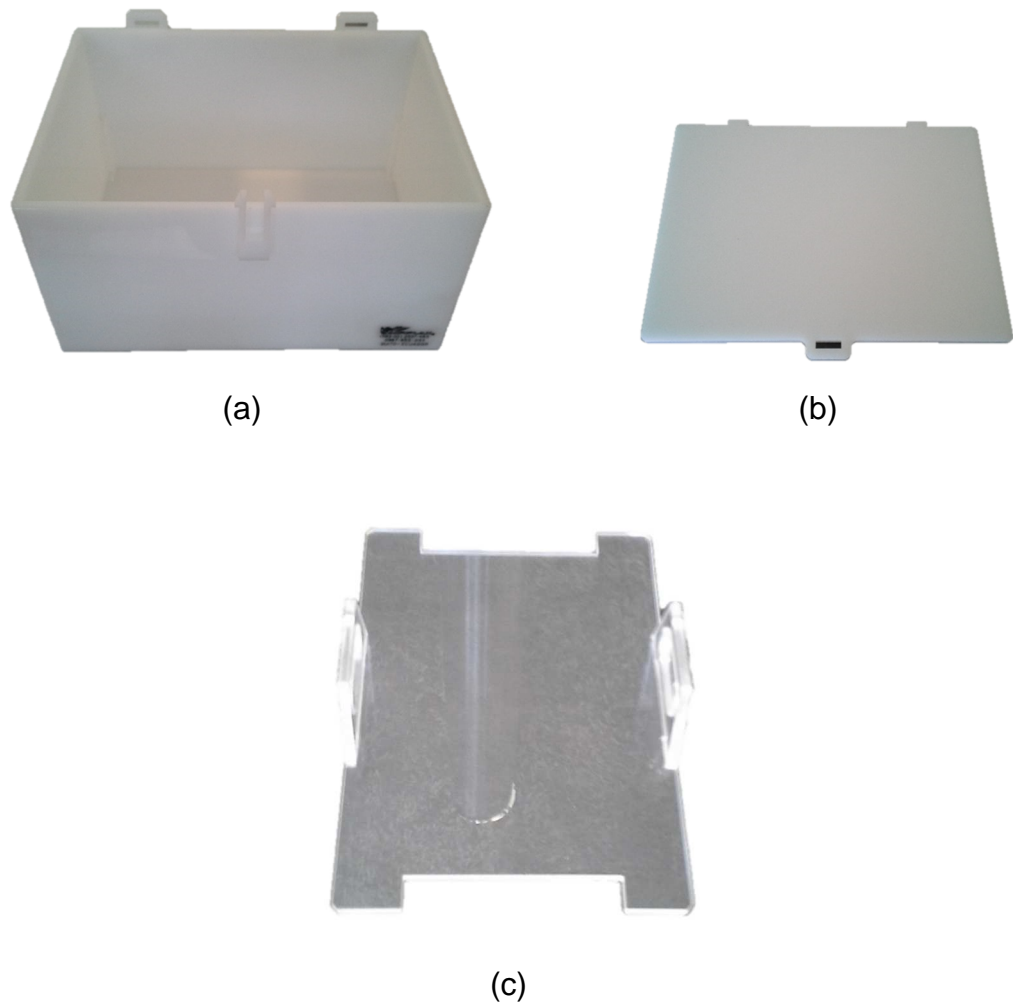
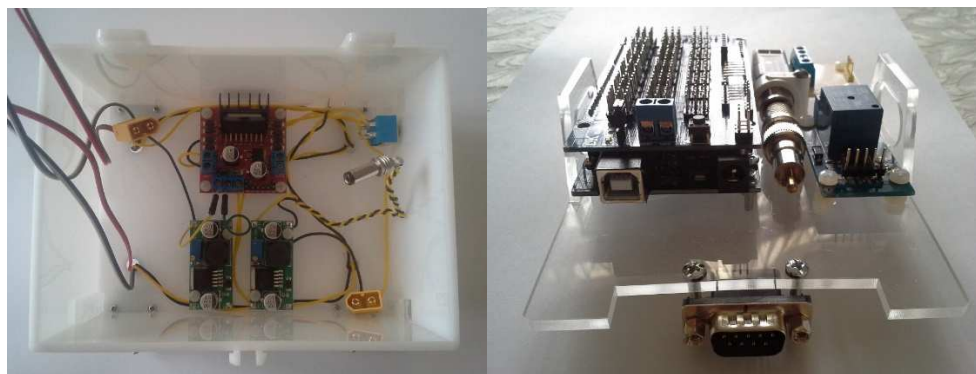


Figura 72. a) Plataforma Base b) Tapa Superior c) Plataforma Superior

### 4.3.2. Ubicación y Fijación de Elementos

La fijación de elementos se realizó mediante tornillos y tuercas dependiendo de los diámetros requeridos para cada elemento, tanto en la plataforma base como en la plataforma superior. Se inició con un taladrado para realizar los agujeros y luego se procedió a atornillar cada elemento individualmente como se aprecia en la figura 73.



(a)

(b)



c)

Figura 73. Ubicación de elementos a) Plataforma Base b) Plataforma Superior c) Circuitos de Comunicación

### 4.3.3. Ensamblaje del Montaje de la Cámara

Para este ensamblaje en particular, se utilizó las instrucciones provenientes del fabricante de la misma cuyo procedimiento podrá observarse en los anexos del presente documento, para simplificar dicho proceso se observan los resultados en la figura 74.

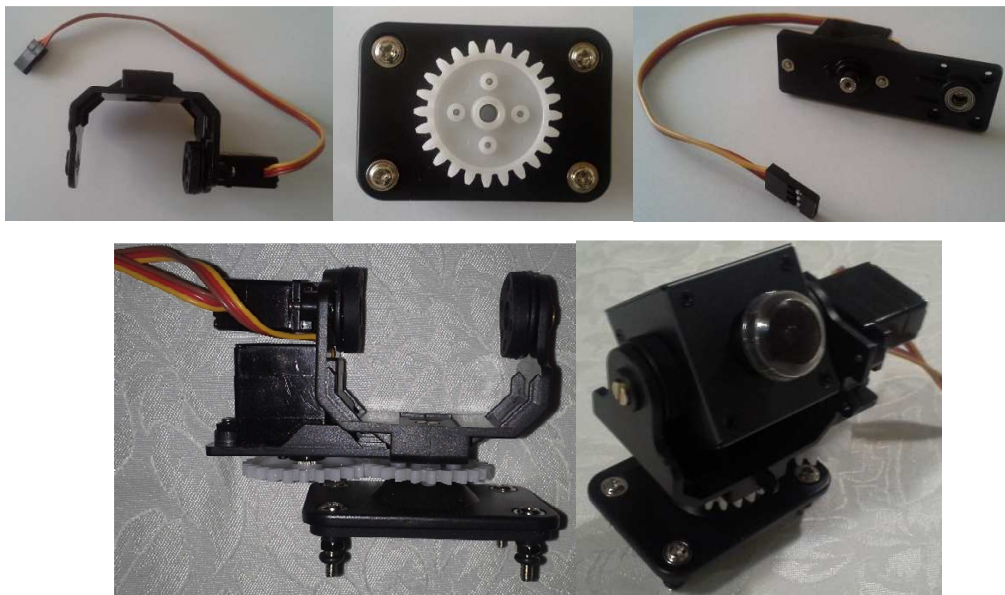


Figura 74. Ensamble Montaje de Cámara

### 4.3.4. Sujeción de la Cámara y Montaje

En este proceso se acopló el montaje armado de la cámara a la plataforma base, perforando los agujeros necesarios y sujetando mediante tornillos y tuercas a los 4 soportes previamente ensamblados como se observa en la figura 75.

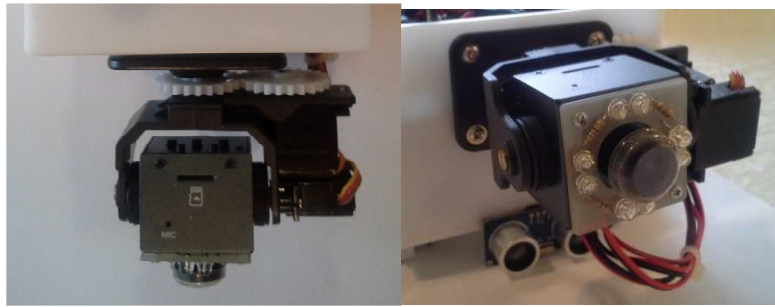


Figura 75. Sujeción de la Cámara a la Plataforma Base

#### 4.3.5. Cableado e Interconexión de Componentes

El cableado de componentes es un proceso que se llevó a la par con la interconexión de los mismos, después de haber culminado con la fijación de cada elemento a su plataforma correspondiente, se tenía que conectar cada dispositivo con el “Arduino Sensor Shield” o entre sí para obtener el sistema final (ver figura 76).

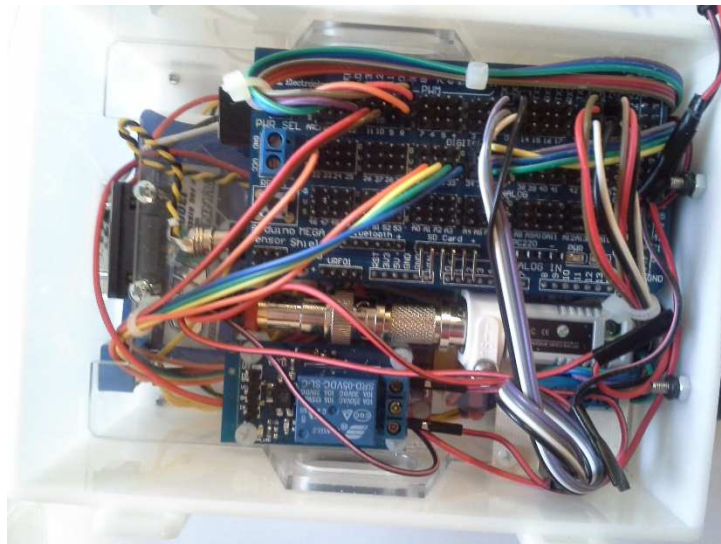


Figura 76. Interconexión de Elementos

#### 4.3.6. Montaje de Sensores

El montaje de sensores fue relativamente sencillo debido a que solo se necesitó taladrar los agujeros correspondientes para cada elemento y realizar su conexión, en este caso de un sensor DHT21, un sensor ultrasónico y un sensor de gas MQ9, los cuales se observan en la figura 77.

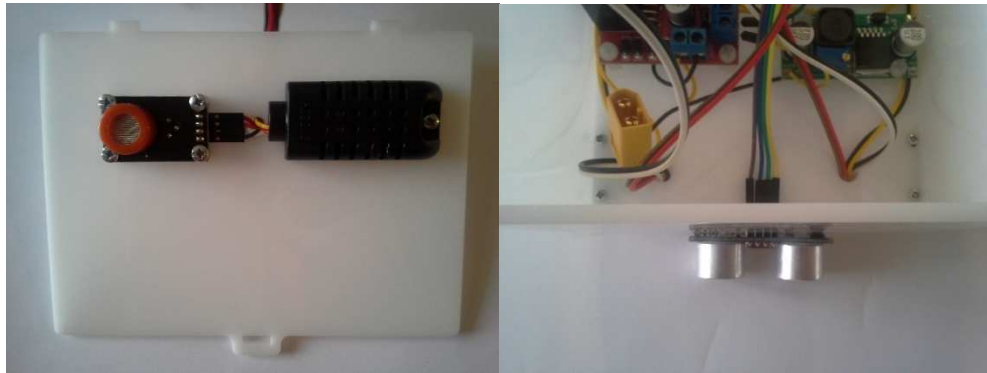


Figura 77. Montaje de Sensores

#### 4.3.7. Montaje de Ruedas

Las ruedas se montaron respecto a un eje del micromotor seleccionado que presenta una ranura en forma de "D" (Figura 78), en la cual encajan perfectamente las ruedas marca "Pololu" (42x19 mm.).



Figura 78. Montaje de las Ruedas

#### 4.4. RESULTADO FINAL

Después de realizar el proceso previamente explicado se concluyó la construcción del robot para inspección de tubería el cual se aprecia en la figura 79.



Figura 79. Resultado Final del Robot para Inspección de Tubería

Debido a su necesaria movilidad de un punto a otro se adaptó una caja para transporte de herramientas encargada de otorgar soporte y cabida al robot y a los circuitos de comunicación. Obteniendo el resultado de la figura 80.



Figura 80. Contenedor de Transporte del Robot

## **CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DEL SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA**

Finalizada la etapa de construcción del robot parte del sistema robotizado para inspección de tubería, se realizaron pruebas para establecer el cumplimiento de los objetivos propuestos para el presente proyecto de grado.

### **5.1. DISEÑO DE PRUEBAS**

Los principales objetivos del sistema robotizado se basan en las dimensiones del sistema, autonomía, sistema de control tanto manual como automático y el desarrollo de la interfaz HMI. Para realizar un diseño de pruebas pertinente se tomó en cuenta fundamentalmente los requerimientos del cliente presentes en la tabla 28, obtenida del análisis realizado en la matriz QFD.

Tabla 28. Requerimientos del Cliente

<b>N°</b>	<b>Requerimiento del Cliente</b>
<b>1</b>	PAN y TILT de la cámara
<b>2</b>	Robot de pequeñas dimensiones
<b>3</b>	Buena autonomía
<b>4</b>	Comunicación a gran distancia
<b>5</b>	Medir Temperatura y presencia de gases
<b>6</b>	Control de velocidad del robot
<b>7</b>	Medición de distancia recorrida
<b>8</b>	Sistema fácil de utilizar
<b>9</b>	Bajo Costo

Las pruebas anteriormente mostradas simplifican el estudio de las capacidades principales a evaluarse en el sistema robotizado para inspección de tubería, son completamente cualitativas porque requieren una apreciación



del usuario para recibir una calificación. Se las estimó mediante los criterios presentes en la tabla 5.2. Se basan principalmente el cumplimiento o no del requerimiento del cliente.

Tabla 5.2. Ponderación de pruebas cualitativas

Ponderación	Parámetros
3	Excelente al cumplir el objetivo
2	Bueno al efectuar el objetivo
1	Deficiente desempeño del objetivo
0	No verifica el objetivo

A continuación se evaluarán cada uno de los requerimientos del cliente:

## 5.2. EVALUACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

### 5.2.1. PAN y TILT de la cámara

El requerimiento del cliente fue un sistema que permita una capacidad de PAN de 360° y un TILT de 180° para observar completamente el interior de la tubería, especialmente todo el cordón de soldadura de la misma. La figura 81, muestra que el montaje utilizado para desempeñar el objetivo, cumple con las expectativas predispuestas, tanto en PAN como para TILT, pero debido a la falta de necesidad de un TILT de 180° se lo restringió a 120°. Por lo tanto la ponderación para PAN es de 3 y para TILT es de 2 como se observa en la tabla 29.



Figura 81. PAN y TILT de la cámara

Tabla 29. Evaluación PAN y TILT de la cámara

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	PAN 360°	3
2	TILT 120°	2
<b>Promedio PAN y TILT de la cámara</b>		<b>2.5</b>

### 5.2.2. Robot de Pequeñas Dimensiones

Puntualmente se requiere un robot capaz de ingresar en una tubería de diámetro 8 plg., para lo cual se tomaron en cuenta las medidas expresadas en el apartado referente a diseño del elemento mecánico donde se realizaron simulaciones que permitan apreciar si las dimensiones eran las adecuadas (Figura 82.). Como resultado se obtuvo un modelo capaz de cumplir con el objetivo deseado como se observa en la figura 83.

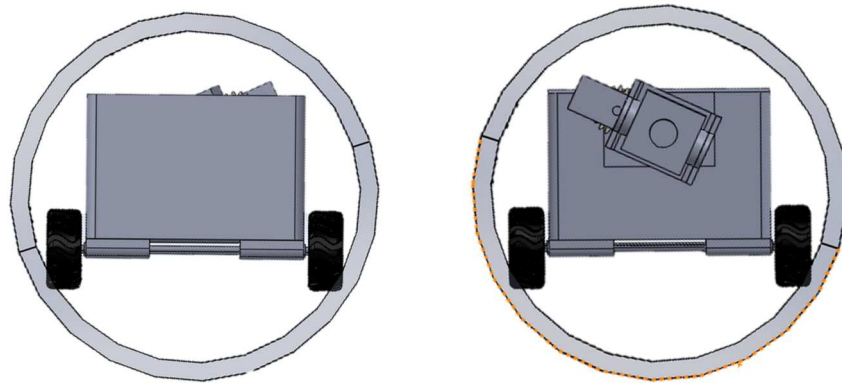


Figura 82. Simulación Tubería de 8 plg.



Figura 83. Prueba en Tubería de 8 plg.

Debido a la disponibilidad de tubería de 10 plg., se probó al robot para inspección de tubería en la misma, se obtuvieron excelentes resultados de la prueba como se observa en la figura 84.



Figura 84. Prueba en Tubo de 10 plg.

Tabla 30 Resultados Robot Pequeñas Dimensiones.

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	Desplazamiento Tubería de 8 plg	3
2	Desplazamiento por tubería de 10 plg.	3
<b>Promedio Robot de pequeñas dimensiones</b>		<b>3</b>

La tabla 30., resume los resultados cualitativos de las pruebas de desplazamiento, las cuales fueron exitosas en todo aspecto, ya sea para el diámetro de tubo diseñado y para tubos de mayor envergadura.

### 5.2.3. Buena Autonomía

Se solicitó una autonomía de 36 horas del robot o la duración de un hora de la batería. El sistema de alimentación del robot para inspección de tubería no presentó fallas de ninguna índole, manteniendo correctamente los niveles de energía para el sistema por más de 1 hora de uso, tiempo más que suficiente para el recorrido de inspección propuesto. El tiempo promedio

necesario observado para la inspección de los 36 metros de tubería es de 33 minutos, considerando tiempo de avance y retroceso. Este valor es completamente relativo debido a la distancia y velocidad a recorrer, pero en general se superaron los objetivos propuestos (Véase tabla 31)

Tabla 31. Resultado Pruebas de Autonomía

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	Operación a los 36 m	3
2	Operación > 1 h	3
<b>Promedio Buena Autonomía</b>		<b>3</b>

Como conclusión de lo anteriormente expuesto se puede deducir que el sistema robotizado para inspección de tubería cumple con los objetivos formulados para el presente proyecto, pero no hay que obviar el problema referido al retardo de comunicación.

#### 5.2.4. Comunicación a Gran Distancia

En este punto se evaluó la capacidad de movimiento autónomo del robot para inspección, se utilizó un cable relativamente corto de 2 metros categoría CAT6A para realizar pruebas de comunicación mediante RS-485 y el envío de la señal de video. En las pruebas de campo se utilizó un cable categoría CAT6A de aproximadamente 40 metros de largo, con el mismo objetivo.

Cabe destacar que la comunicación RS-485 teóricamente cubre hasta distancias de 1200 metros pero se necesitan cables de gran calidad para lograr alcances superiores a los 40 metros. En este caso el cable CAT-6A es

uno de los mejores en el mercado, con mayor fiabilidad de resultados en cuanto a cable de red se refiere, en pasadas experiencias se detectó que el cable CAT 5 presenta serias falencias de comunicación al intentar una interconexión de más de 20 metros, por lo que el costo y utilización de cable se ve justificado

El envío de imágenes mediante “Balun de video” proporciona una comunicación entre un emisor y receptor de aproximadamente 1000 metros con receptores activos y 300 metros con receptores pasivos. Para obtener un ejemplo de la calidad de imágenes enviadas por el “Balun de Video” a 40 metros observar la figura 85, Aquí también puede observarse la calidad de iluminación presente el prototipo.

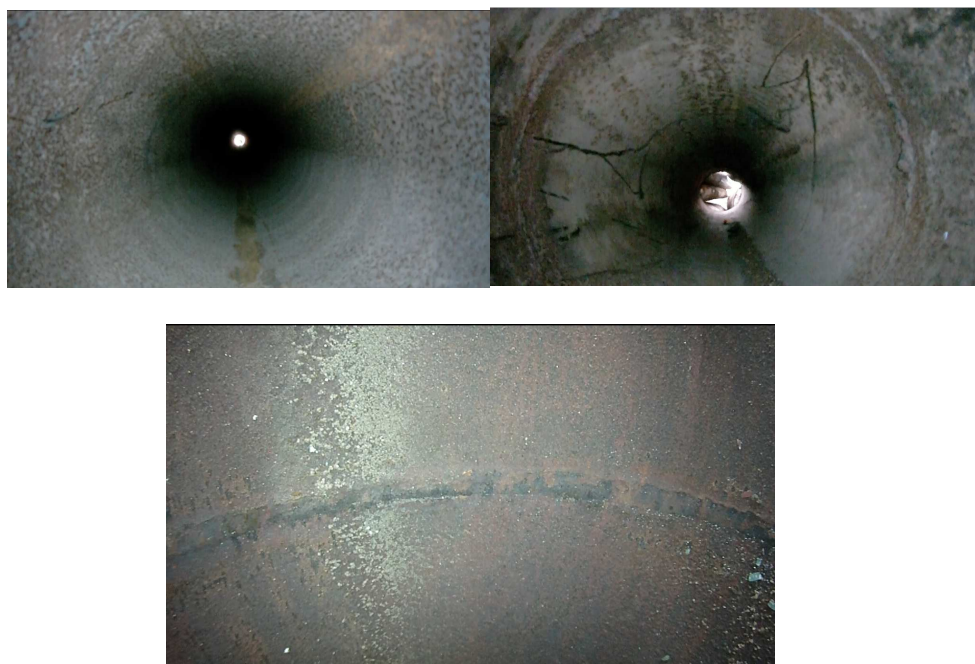


Figura 85. Imágenes Obtenidas del Robot para Inspección de Tubería

Mencionados estos parámetros hipotéticamente el alcance del sistema es de 1000 metros mucho más de lo necesario para cumplir el objetivo de comunicación entre las partes del sistema, dando así una respuesta satisfactoria para el sistema robotizado para inspección de tubería. Pero, un problema que aqueja a todo sistema teleoperado es el retardo en enviar y recibir las señales cuya variable más representativa es en este caso la distancia del cable encargado del transporte de información. Mediante un análisis subjetivo se pudo determinar que el retardo aumenta mientras más distancia recorre la información a través del cable. En el caso del cable de 2 metros el retardo es de aproximadamente 0.1 s., en el caso del cable de 40 metros el retardo bordea alrededor de 0.2 y 0.3 segundos. Se refiere a estos valores como subjetivos debido a que no se cuenta con elementos para medir con una mayor precisión estos valores de retardo.

A pesar de cumplir con el objetivo como se mencionó previamente, el retardo si juega un rol fundamental si necesitamos movimientos precisos del robot o lecturas instantáneas de los sensores en casos de emergencia.

Tabla 32. Resultado Pruebas de Comunicación.

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
<b>1</b>	Comunicación a los 2 m.	3
<b>2</b>	Comunicación a los 40 m.	2
<b>Promedio Comunicación a Grand Distancia</b>		2.5

### 5.2.5. Medir Temperatura y Presencia de Gases

Para el monitoreo de temperatura y gas se utilizó un sensor DHT21 y un sensor MQ-9 (figura 86) respectivamente. Los valores para cada uno de las variables se presentan en el HMI correspondiente, los sensores denotan buena precisión además de ser robustos y de bajo costo.

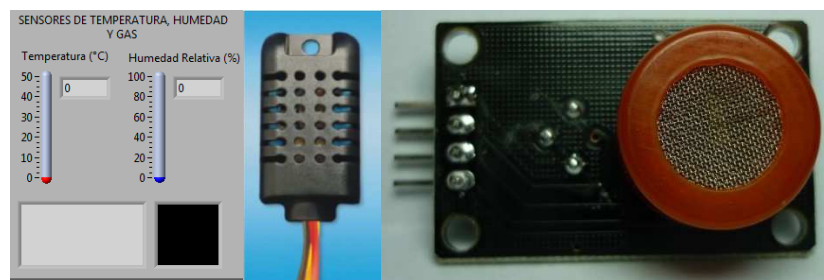


Figura 86. Sensor DHT21 y MQ9

En la tabla 33, se puede apreciar la valoración cualitativa otorgada a cada uno.

Tabla 33. Resultados Pruebas de Sensores

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	Medición de Temperatura y Humedad	3
2	Medición de Presencia de Gases	3
	Promedio medir Temperatura y Presencia de Gases	3

### 5.2.6. Control de Velocidad del Robot

La velocidad de los motores del robot se la controló mediante PWM utilizando una perilla que permite escoger entre 80 y 254, para definir el ciclo de trabajo (duty cycle). La perilla nombrada se encuentra en el HMI diseñado



(figura 87). El color verde indica una velocidad baja, mientras el control rojo indica una alta velocidad.

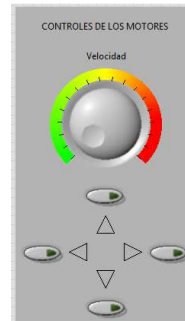


Figura 87 Control de Velocidad del Robot

La tabla 34, muestra la ponderación otorgada a dicho requerimiento del cliente.

Tabla 34. Resultados Control de Velocidad del Robot

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	Control de Velocidad del Robot	3

### 5.2.7. Medición de Distancia Recorrida

La distancia recorrida se muestra en el HMI de acuerdo a los lineamientos propuestos y a los diferentes valores obtenidos experimentalmente (Ver figura 88), los cuales se cotejan con el número de revoluciones de la rueda para así obtener un valor en m de la distancia (Ver tabla 35)

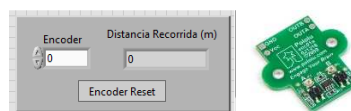


Figura 88. Medición de Distancia Recorrida (Encoder)

Tabla 35. Resultados Pruebas de Medición de Distancia Recorrida

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
	Medición de distancia recorrida.	3

### 5.2.8. Sistema Fácil de Utilizar

La interfaz HMI (figura 89) además de ser un sistema meramente intuitivo, no pretende mayores complicaciones. Además de tener todos los letreros en indicaciones necesarias para su correcto uso y funcionamiento. Esta fue probada y aceptada por el cliente sin mayores cambios. Resultado en la tabla 36.



Figura 89. Pantalla HMI

Tabla 36. Resultado Sistema Fácil de Utilizar

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
	Sistema Fácil de Utilizar	3

### 5.2.9. Bajo Costo

El eje fundamental de la construcción del robot es el costo, el cual debe ajustarse al presupuesto destinado para construcción del robot y sus partes. Por lo tanto, tomando en cuenta que el presupuesto destinado que se observa en el Anexo F, concuerda dentro de los planes del presupuesto pactado se garantiza así el cumplimiento del objetivo planteado (Ver tabla 37).

Tabla 37. Resultado Bajo Costo

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
	Bajo costo	3

### 5.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN A LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

Resultando así a continuación en la tabla 38, un resumen con todos los resultados obtenidos en el posterior análisis realizado en el apartado 5.2.

Tabla 38. Resultados Evaluación Requerimientos del Cliente

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	PAN y TILT de la cámara	2.5
2	Robot de pequeñas dimensiones	3
3	Buena autonomía	3
4	Comunicación a gran distancia	2.5
5	Medir Temperatura y presencia de gases	3
6	Control de velocidad del robot	3
7	Medición de distancia recorrida	3
8	Sistema fácil de utilizar	3
9	Bajo Costo	3

#### 5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS AL SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍA

Como se explicó en los apartados 5.2. y 5.3., se utilizaron los siguientes criterios cualitativos (Tabla 39) para lograr realizar una evaluación al sistema robotizado para inspección de tubería.

Tabla 39. Parámetros de Ponderación Cualitativa

Ponderación	Parámetros
3	Excelente al cumplir el objetivo
2	Bueno al efectuar el objetivo
1	Deficiente desempeño del objetivo
0	No verifica el objetivo

Las características evaluadas son los requerimientos del cliente, los cuales se resumen en la tabla 40 con sus respectivas ponderaciones.

Tabla 40. Requerimientos del Cliente y Ponderación

N°	Requerimiento del Cliente	Ponderación
1	PAN y TILT de la cámara	2.5
2	Robot de pequeñas dimensiones	3
3	Buena autonomía	3
4	Comunicación a gran distancia	2.5
5	Medir Temperatura y presencia de gases	3
6	Control de velocidad del robot	3
7	Medición de distancia recorrida	3
8	Sistema fácil de utilizar	3
9	Bajo Costo	3

Mediante un análisis exhaustivo del sistema robotizado para inspección de tubería, se tomó en cuenta directamente un análisis de costo y beneficio asociado con el sistema y con los otros sistemas existentes en el mercado.

Actualmente, existen diferentes tipos de robots para inspección de tubería en el mercado, de los cuales es sumamente complicado la obtención de información porque sus creadores protegen el “Know How” de sus productos porque no quieren que se copie o se reproduzca, afectando sus ganancias.

La empresa “PANATEC” distribuye los conocidos “CRAWLER” de la serie “ROVION”, para inspección de tubería asociados directamente con la empresa “IPEK”, encargado de construirlos cuya sede se encuentra en Alemania.

Los “CRAWLER ROVION” son robots de alta tecnología destinados únicamente para la inspección de tubería, existen varias modificaciones e implementos capaces de otorgar al dispositivo múltiples capacidades para el desarrollo de sus actividades. Para centrar el estudio se referirá al “ROVION CRAWLER RX130”, porque este permite el estudio dentro de tuberías desde los 150 mm hasta los 1000 mm de diámetro (con varios aditamentos extras), contemplando la tubería de 8 plg., de diámetro para la cual se planteó el presente proyecto de grado. En la tabla 41. se observan las características técnicas del mismo.

Tabla 41. Características Rovion Crawler RX130

Característica	Descripción
<b>Tracción</b>	6 ruedas, Skid-Steer
<b>Equipo</b>	Dirigible, cámara trasera, transmisor de ubicación, sensor de paso, monitoreo de presión
<b>Resistencia a presión</b>	Max. 1 bar
<b>Alimentación</b>	110 VAC. por cable
<b>Protección</b>	IP68 hasta 10 m de profundidad.
<b>Material</b>	Aluminio Anodizado
<b>Software</b>	Wincan
<b>Inspección</b>	Sistema Láser
<b>Cable</b>	Según necesidad, estándar 150 m
<b>Equipos de comando y visualización</b>	Por convenir: panel de control o computador.

Con la información requerida se realizó un análisis comparativo entre los dos sistemas de inspección de tubería cuyos resultados se observan en la tabla 42, la ponderación de los datos son meramente cualitativos.

Tabla 42. Análisis Comparativo Crawler Rovion RX130 y el Sistema Robotizado de Inspección de Tubería

N°	Características del Sistema	Ponderación		
		Sistema Robotizado para Inspección	Crawler Rovion RX130	Max.
1	PAN y TILT de la cámara	2.5	3	3
2	Robot de pequeñas dimensiones	3	3	3
3	Buena autonomía	3	3	3
4	Comunicación a gran distancia	2.5	3	3
5	Medir Temperatura y presencia de gases	3	1	3
6	Control de velocidad del robot	3	3	3
7	Medición de distancia recorrida	3	3	3
8	Sistema fácil de utilizar	3	3	3
9	Bajo Costo	3	0	3
10	Cámara Posterior	0	3	3
11	Sistema Láser de Inspección	0	3	3
12	Protección IP68	0	3	3
13	Material de Fabricación	1	3	3
14	Sumergible hasta 10 m de profundidad	0	3	3
15	Módulos Opcionales	0	3	3
<b>Total</b>		27	40	45
<b>Porcentaje (%)</b>		60	89	100

La tabla 42, muestra la superioridad del “CRAWLER ROVION RX130” pero la diferencia entre las opciones radica en el precio. El antes mencionado robot se encuentra a un precio base de €35000 (\$ 44100 USD, al cambio actual 1€=1.26USD) pudiendo llegar hasta los €65000 (\$ 81917 USD, al cambio actual 1€=1.26USD) dependiendo el costo directamente de las configuraciones a elegir para el trabajo a realizarse. El sistema robotizado para inspección de tubería del presente proyecto de grado tuvo un costo de \$ 2156 USD., tomando en cuenta todos los aspectos para su culminación.

La empresa IPEK lleva alrededor de 26 años en el mercado de los sistemas robotizados para inspección de tubería, siendo su primer modelo construido en un sótano en el año de 1988. Desde entonces la empresa ha crecido enfocándose puramente a la investigación, desarrollo y construcción de sistemas para inspección de tubería logrando de esta manera posicionarse como líderes y vanguardistas de este tipo de sistemas.

El costo del “CRAWLER ROVIO RX130” se fundamenta en que sus piezas son realizadas a la medida en aluminio anodizado y su cámara posee un zoom digital de 10X y óptico de 4X, un dispositivo de video de estas características del tamaño requerido bordea aproximadamente los \$1200 USD., la empresa IPEK desarrolla y comercializa este tipo de cámaras.

La estación de control también es realizada a la medida, existen varios modelos disponibles y con múltiples configuraciones, de la misma manera sucede con los cables de alimentación y comunicación.

Un punto de gran importancia es el sistema de inspección por Láser, que permite obtener características intrínsecas del interior de la tubería mediante un software de alta tecnología. Para la realización de informes de inspección utiliza el software “WINCAN” de venta para cualquier equipo de inspección CCTV de tubería pero estándar en los equipos “ROVION”. La empresa desarrolladora de este software lleva 17 años en el mercado. El software generador de informes “WINCAN” es líder en el mercado y muestra una modularidad que facilita su utilización además de varias características en los diferentes paquetes disponibles para comercialización (Figura 90).



#### WinCan VX - For Contractors

WinCan VX is the core of the entire WinCan product family. It offers the core functionality you need to collect pipe inspection data, organize it into a database, and generate inspection reports that graphically display the pipe and its defects.

[> more information](#)



#### WinCan Analyst - For Municipalities

WinCan Analyst is a software to value, manage and analyse Sewer Networks. One of the main values of WinCan Analyst is the seamless integration into different GIS Systems and the optimisation for high performance. WinCan Analyst contains different functional areas: Management of status data of the sewer systems including their automated classification and analysis of the characteristics of the sewer Systems.

[> more information](#)

Figura 90. Software para Generación de Informes de Inspección WINCAN

FUENTE: (Wincan, 2014)



Además de las características previamente mencionadas el “CRAWLER ROVION 135” cumple con la norma IP68 (sumergible hasta 10 m) y la capacidad de soportar una presión de hasta 1 bar. Estas dos características no se encuentran en los requerimientos del cliente porque se requiere trabajar en condiciones que no requieren la inmersión del equipo.

Todos los factores anteriormente descritos además de todos los años dedicados a la investigación del sistema encarecen al mismo. Volviendo su precio prácticamente impagable para una empresa pequeña como la auspiciante del presente proyecto de grado. Incluso el gobierno de Colombia adquirió un robot para inspección de tubería que bordeaba los \$500000 USD, superando así los precios de la compañía IPEK.

La horquilla de precios anteriormente mencionados son aplicables solo en España (país donde se consultó la información vía e-mail) a estos se les debería añadir los costos de importación e impuestos de ley. Al no existir referencias que permitan calcular el costo total del equipo después de la desaduanización correspondiente debido a la falta de partidas.

Después de lo anteriormente expuesto, el presente proyecto de grado se concentró en cumplir los objetivos propuestos para el mismo, a pesar de no encontrarse a la altura de los sistemas de inspección desarrollados por la empresa “IPEK”, cuyo tiempo de investigación y monto de inversión superan por un alto margen a los disponibles para el mismo. Mostró de manera

sobresaliente la consumación de los requerimientos del cliente en su etapa de prototipo, al cual se le realizaron un limitado número de pruebas por lo restringido del presupuesto otorgado para el desarrollo del sistema, por una fracción del dinero necesario para costear un equipo de inspección "IPEK". Resultando así en un sistema que fue adoptado por la empresa auspiciante de la mejor manera y con miras a una mayor inversión para mejorar paulatinamente el sistema robotizado para inspección de tubería operado remotamente.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- Las dimensiones específicas comprendidas en la parte mecánica del robot para inspección de tubería son acertadas para su trabajo dentro de tuberías de diámetro de 8 plg. Se probó también el robot en tuberías de 10 plg. de diámetro. En la tabla 43. se encuentra la métrica total del robot para inspección de tubería, las cuales obtuvieron resultados positivos avalando así, la funcionalidad del mismo.

Tabla 43. Dimensiones Finales del Robot para Inspección de Tubería

<b>Dimensión</b>	<b>Métrica (mm)</b>
<b>Alto</b>	230
<b>Ancho</b>	60
<b>Profundidad</b>	230

- La autonomía del robot refiriéndose a comunicación y envío de video, como se explicó en el capítulo 5, teóricamente alcanza una distancia de 300 metros muy superior a los 36 metros necesarios para el diseño en particular. Tratando el tema de alimentación, este cumple con los requerimientos necesarios (mayor a 1 hora de operación) superando los requerimientos del cliente.
- El sistema de control tanto manual como automático fueron evaluados en el capítulo 5, y como se explicó en dicho apartado, estos presentan un desempeño exitoso para la maniobrabilidad del robot de inspección, pero presentan un problema de un retardo en el envío y recepción de datos debido a la longitud del cable, propio de todo

sistema teleoperado. Este factor no presenta mayores inconvenientes en el funcionamiento normal del sistema robotizado para inspección de tubería.

- La interfaz HMI presenta practicidad y simpleza, mostrando únicamente los controles necesarios para la correcta operación por parte del usuario. Se lo ha diseñado pensando en un método intuitivo, sin complicaciones para el operador, lo que resultó en un sistema que cumple con los requisitos esperados tanto en maniobrabilidad como en facilidad de operación. La obtención de imágenes se la realizó mediante visión artificial, en este caso el operador completa el lazo de control identificando los problemas y características a tomar en consideración dentro de la tubería. Este proceso dio muy buenos resultados, pero a futuro se pretende aprovechar de mejor manera los atributos que intervienen propios de la visión artificial, como el reconocimiento mediante patrones, colores, etc.
- En conclusión, como se explicó en el capítulo 5, las pruebas realizadas al sistema robotizado para inspección de tubería cumple con los requerimientos del cliente además logró un 60% de éxito del total de la calificación cualitativa, superado por el “Crawler Rovion RX130”, propuesto para comparación, quien obtuvo un 88% . Pero si comparamos precios, el sistema robotizado para inspección de tubería se fabricó por una fracción del precio del robot a importar, mostrando así la importancia del sistema.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Fomentar el estudio de sistemas robotizados basados en teleoperación, debido a la gran cantidad de posibles usos y aplicaciones en el país; ya sean en el entorno industrial, investigación o recreacional. La principal característica de estos sistemas es proveer

seguridad al operador, considerando ambientes hostiles y/o inalcanzables para un ser humano, proponiendo un campo de estudio muy amplio y de grandes prestaciones futuras, por lo que se recomienda continuar con un estudio más profundo de esta rama fundamental de la robótica.

- Aprovechar las ventajas que provee la visión artificial buscando un análisis más profundo de la tubería, ya sea mediante fotogramas, colores, patrones y muchas otras características disponibles gracias a este tipo de sistemas de análisis de imágenes. También se recomienda utilizar una cámara que posea “zoom”, en el prototipo actual no se utilizó un dispositivo con esta capacidad debido a los costos que implican estos.
- Analizar otros posibles medios de comunicación para disminuir el retardo en el envío y recepción de datos, como ejemplo un sistema de comunicación mediante fibra óptica o mediante un protocolo Ethernet, cuyas distancias de comunicación son superiores a las ofrecidas por la comunicación RS-485 y a mayor velocidad.
- El monitoreo de la cantidad de energía de alimentación no era uno de los objetivos del presente proyecto de grado. Se recomienda un análisis más profundo de este tema para así lograr de preferencia, mediante el HMI, un control de la energía presente en las baterías para tener un mayor control del robot dentro de la tubería y evitar percances como atascamientos dentro de la misma.

## Referencias Bibliográficas

- Cross, Nigel. (2005). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Chippenham: Wiley.
- Damaris. (25 de Noviembre de 2010). *Robótica*. Obtenido de <http://inteligencia-artificialrobotica.blogspot.com/p/clasificacion-de-los-robots.html>
- Delgado, G. Daniel. (Julio de 2008). *SLIDESHARE*. Obtenido de <http://www.slideshare.net/warmth/final-18046576>
- Diolaiti N. (2002). *Teleoperation of a Mobile Robot through Haptic Feedback, IEEE International Workshop 2002 HAVE Haptic Virtual Environments and Their Applications*.
- Ghodoussi M. (2002). *Robotic Surgery – the Transatlantic Case, ICRA '02. IEEE International Conference on Robotics and Automation*,.
- Gómez, Mario, A. (07 de 01 de 2011). *CINVESTAV-Tamaulipas*. Obtenido de <http://www.tamps.cinvestav.mx/~mgomez/Odometria/node4.html>
- Irene. (s.f.). *Irene Robotica*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/irenerobotica/3-definicion-de-robot>
- ISO. (2011). *International Organization for Standardization*. Obtenido de [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=41571](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=41571)
- Linkmesch. (2013). *LINKMESH ROBOTS*. Obtenido de [http://www.linkmesh.com/robots/articulos/definiciones\\_de\\_los\\_robots.php](http://www.linkmesh.com/robots/articulos/definiciones_de_los_robots.php)
- Nuño, Emmanuel. (2004). *Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno*. Barcelona, España.
- Ollero B. A. (2001). *Robótica; manipuladores y robots móvil*. Marcombo: Editorial Alfaomega.
- Panatec. (2013). *Panatec*. Obtenido de <http://www.panatec.net/agua/Robot-Inspeccion-Rovver.php>
- RIA. (2004). *Robotics Industries Association*. Obtenido de <http://www.robotics.org/>

Schilling K.J. (2002). *Remotely controlled experiments with mobile robots, Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern, Symposium on System Theory,.*

**ANEXO A. Resumen entrevista realizada el Gerente de FSB  
RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES**



**ANEXO B. Planos Parte Mecánica Robot para Inspección de Tubería**

**ANEXO C. Manual de Usuario**

**ANEXO D. Manual Montaje de la Cámara BOSCAM HD19**

**ANEXO E. Manual Cámara BOSCAM HD19**

**ANEXO F. Costo Total**

**ANEXO G. Diagrama Eléctrico**

**ANEXO H. Vista Explosionada del Robot para Inspección de Tubería**

**ANEXO I. Diagrama de Programación en Labview**