

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

Francisco Alejandro Sanchez Samaniego

“Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE”

e-mail: [fasanchez4@espe.edu.ec](mailto:fasanchez4@espe.edu.ec)

## 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. 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. 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, visual, tubería.

## 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. 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. The system is based in “Arduino” technology, the HMI was fully programmed in “Labview” using the “Arduino Toolkit” for “Labview”.

**Key Words:** robot, inspection, visual, pipeline.

## Introducción

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.

## 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.

## **Alcance**

El presente proyecto de grado busca diseñar y construir un robot para inspección visual de tubería operado remotamente, el cual basará su sistema de adquisición de imágenes en tiempo real, en un cámara montada sobre una plataforma que permitirá el PAN y TILT de la misma, la cual estará comunicada con un ordenador, además de recibir y presentar dicha señal de video otorgará la capacidad de controlar el desplazamiento del vehículo parte del sistema robotizado.

El vehículo de exploración estará completamente basado en tecnología Arduino, debido a sus reducidos costos y la facilidad que presenta el uso de su entorno de desarrollo. La función principal del sistema robotizado recaerá en la obtención de información del interior de la tubería mediante sensores dispuestos en el mismo y mediante el análisis de la señal de video enviada por la cámara que permita detectar cualquier falla que atente contra su integridad al cumplir el objetivo de conducción del hidrocarburo.

La interfaz con el operador o llamada HMI será la encargada de la manipulación del robot a distancia esta será programada en el software "Labview", cuyo propósito también consistirá en obtener ciertos parámetros del interior de la tubería además de verificar datos de suma importancia como es la distancia recorrida por el robot en el interior de la tubería.

El diseño mecánico basa su concepto en que el sistema robotizado en un prototipo por lo cual sus materiales son económicos. El prototipo será construido en materiales livianos y será específicamente diseñado para usarse en plano.

## **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.

### **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 sub-funciones 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.

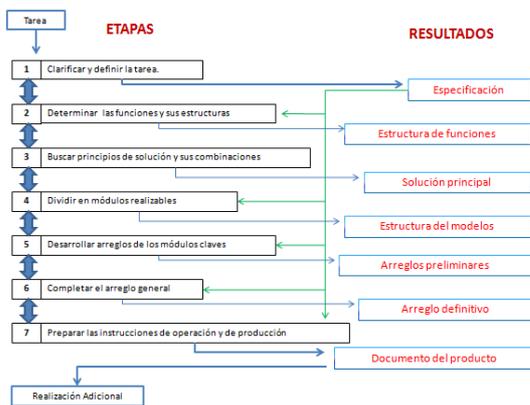


Figura 1 Metodología de Diseño VDI 2221

FUENTE: (Cross, Nigel, 2005)

## Revisión Bibliográfica

### 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 movilizarse 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.).
- 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)

### 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, la 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.

### Robots Para Inspección De Tubería

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 ROVVER cuyos precios oscilan entre USD \$24000 y USD \$37000, sin mencionar todos los valores anteriormente mencionados.



Figura 2. Robot Serie ROVION  
FUENTE: (Panatec, 2013)

## Desarrollo

### Diseño Del Robot Para Inspección De Tubería

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

#### Método de Despliegue de la Casa de la Calidad (QFD)

#### Requerimientos del Cliente

Tabla 1. Requerimientos del Cliente

N°	Requerimiento del Cliente
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

Tabla 2. Características Técnicas

N°	Características Técnicas
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

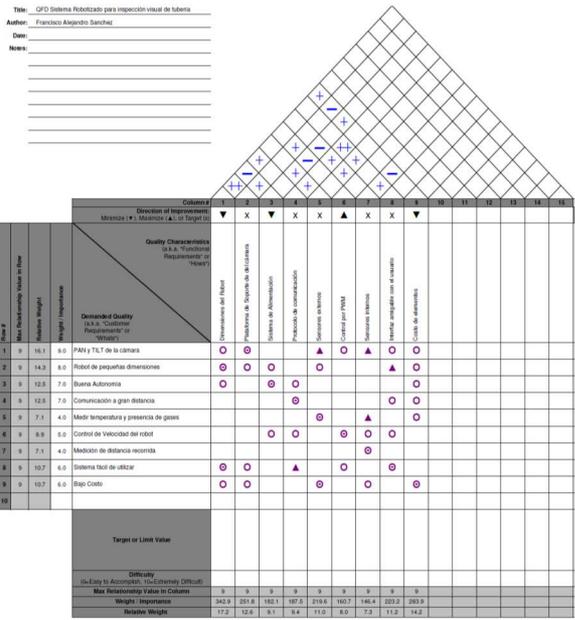


Figura 3. Despliegue Matriz QFD

**Tabla de Especificaciones**

Tabla 3. 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	de 1 Hora
13	D	Fuente de alimentación vehículo	de 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

**ETAPA 2. DETERMINAR LAS FUNCIONES Y SUS ESTRUCTURAS**

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.

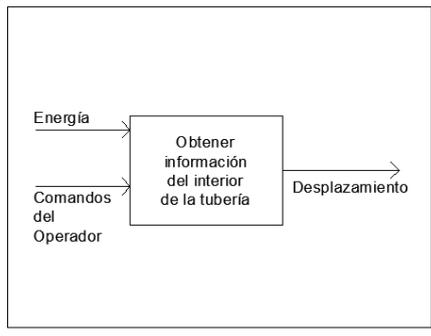


Figura 4. Diagrama de la Caja Negra

**Identificación de las funciones Secundarias**

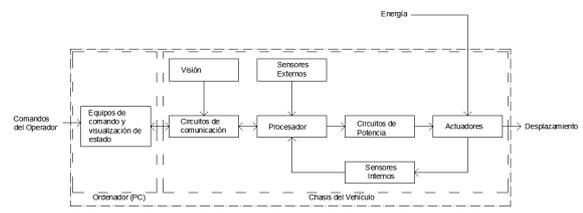


Figura 5. Funciones Secundarias

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

**Desarrollo de la Matriz Morfológica**

Tabla 4. Solución Principal

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

#### ETAPA 4 DIVIDIR EN MÓDULOS REALIZABLES

##### 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

#### ETAPA 5: DESARROLLAR ESQUEMAS DE LOS MÓDULOS PRINCIPALES

##### Módulo 1: Estructura mecánica

##### Plataforma Base

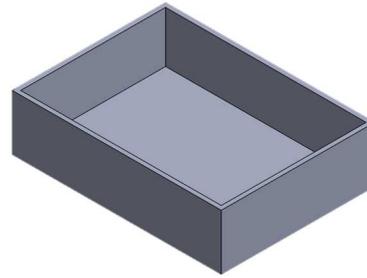


Figura 6. Plataforma Base

##### Plataforma Superior

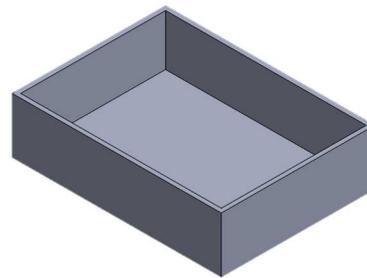


Figura 7. Plataforma Superior

##### Ensamblaje de Plataformas

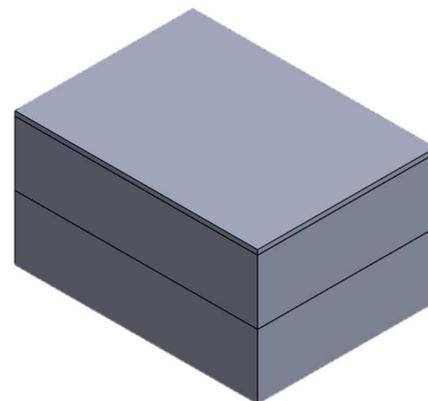


Figura 8. Ensamblaje de Plataformas

##### Módulo 2: Estructura Electrónica

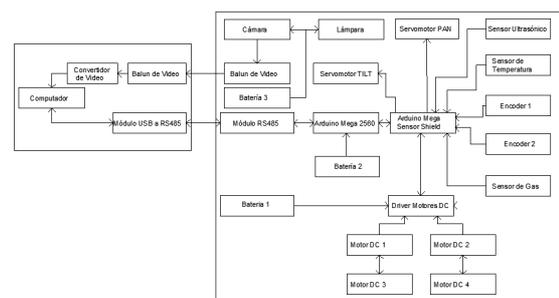


Figura 9. Diagrama Electrónico

### Módulo 3: Estructura de Control

#### Diagrama de Flujo del Sistema

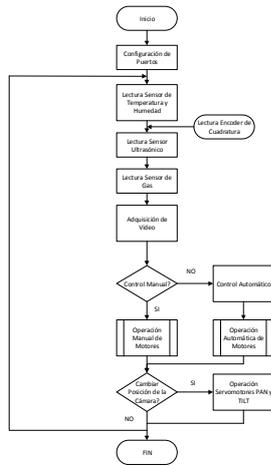


Figura 10. Diagrama de Flujo del Sistema

### ETAPA 6 COMPLETAR EL ESQUEMA DEFINITIVO

#### Módulo 1

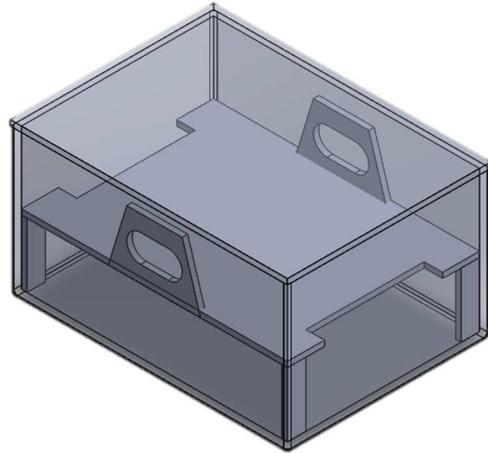


Figura 13. Ensamblaje Final

#### Módulo 2

Tabla 5. Conexión Pines Arduino

Pin Arduino	Mega	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

#### Control Manual

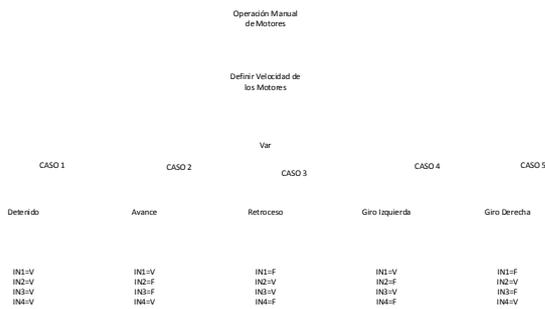


Figura 11. Diagrama de Flujo Control Manual

#### Control Automático

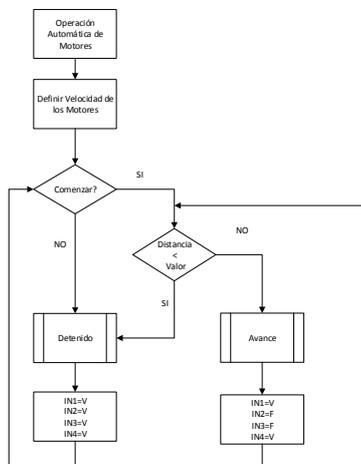


Figura 12. Diagrama de Flujo Control Automático

#### Módulo 3

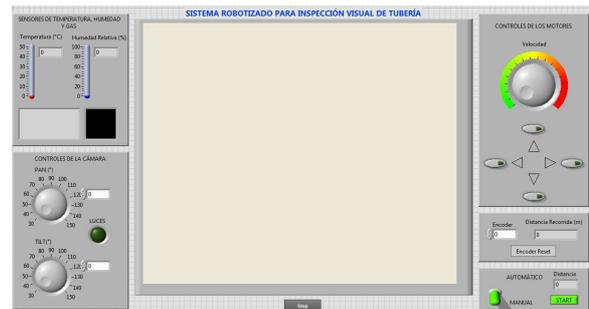


Figura 14. Pantalla HMI

## Pruebas y Resultados

### Resultado Final

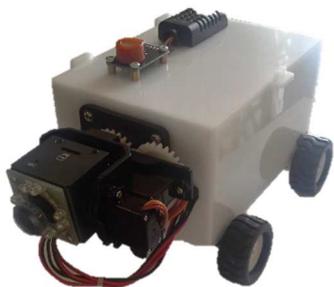


Figura 15. Imagen Robot para Inspección Visual de Tubería

Tabla 6. Resultados de la Evaluación

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

## 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 funcionabilidad del mismo.
- 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.

## **Bibliografía**

Cross, Nigel. (2005). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Chippenham: Wiley.

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)

Nuño, Emmanuel. (2004). *Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno*. Barcelona, España.

Panatec. (2013). *Panatec*. Obtenido de <http://www.panatec.net/agua/Robot-Inspeccion-Rover.php>

RIA. (2004). *Robotics Industries Association*. Obtenido de <http://www.robotics.org/>