

# **REPORTE DE PROYECTO INDUSTRIAL**

**Desarrollo electrónico para un sistema de  
tracción de un robot inspector de tuberías  
con diámetros de 12" a 18"**

QUE PARA OBTENER  
LA ESPECIALIDAD TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

PRESENTA

**ING. GIOVANNI ULISES CAMPUZANO RODRIGUEZ**

Tutor Académico

M. C. y T. Julio César Solano Vargas



QUERETARO, QRO. AGOSTO 2017.



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL  
CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN TECNOLÓGICA

**AUTORIZACIÓN**  
**PUBLICACIÓN EN FORMATO ELECTRÓNICO DE TESIS**

Fecha: \_\_\_\_\_

El que suscribe Alumno (a) .....

CURP ..... CVU.....

ORCID .....

Correo electrónico (opcional)  
.....

Egresado (a) de .....

.....

Autor de la Tesis titulada .....

.....

Por medio del presente documento autorizo<sup>1</sup> en forma gratuita y permanente a que la Tesis arriba citada sea divulgada y reproducida para publicarla mediante almacenamiento electrónico que permita el acceso al público a leerla y conocerla visualmente, así como a comunicarla públicamente en Página Web.

La única contraprestación que condiciona la presente autorización es la del reconocimiento del nombre del autor en la publicación que se haga de la misma.

Atentamente

-----  
Nombre y firma del tesista

<sup>1</sup> Ley Federal de Derechos de Autor

Para obtener tu ORCID regístrate en: <https://orcid.org/register>

## Agradecimientos

A mis **padres** quienes me han apoyado siempre para poder llegar a esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme moral y psicológicamente en cualquier momento de mis estudios.

A mis **hermanos** que han sido un pilar muy importante para poderme realzar en mi vida profesional, espero y poderles servir de ejemplo en un futuro no muy lejano.

A la **mujer** que siempre ha estado presente en todo momento durante mi estancia en el posgrado y es un pilar muy importante para la culminación de la misma, gracias a ti Ivon Chavez que con tu apoyo constante y amor incondicional logre sacar adelante mi grado profesional.

A mi **asesor** el M. C. y T. Julio Cesar Solano Vargas, de quien he aprendido mucho y me ha ayudado a sacar este documento y mi proyecto adelante, pero sobre todo gracias por su amistad, conocimientos y atención que me brindó a lo largo de todo este tiempo. También a mis compañeros, maestros y doctores con los que tuve la dicha de compartir momentos especiales, pero sobre todo por su amistad brindada hacia a mí.

Por último, me tomo el espacio para agradecer a dos grandes instituciones, al **CONACYT** y a **CIDESI** que sin estos no tendría esta gran oportunidad de seguir preparándome profesionalmente.

### **Abstract**

Robotic inspection is more efficient for pipeline preventive maintenance than manual inspection, but current robots have difficulties to inspect on variable pipe-diameters and explosive environments. The main objective of this project is developing electronics for a driving system implemented in a inspection robot to work in pipelines containing aviation fuel, having the capability to adapt in pipe-diameters ranging from 12" to 18". The robot will be classified in three parts; rear-wheel, front-wheel drive and adaptability mechanism, where an electronic system will be installed inside capsules attached to the mechanisms applying control over them. A controller will be the vital part for controlling all engines in the robot, this controller communicates via transceiver to another controller and in the same time to an external CPU, so each capsule will include one of them to achieve autonomy. Electronics will have the role to isolate and condition digital signals from controller to the power stage where there will be most of the power consumption to the engines. Clinometers, encoders, among other feedback sensors will help to control the driving of the robot. It is expected to have electronics able to clean up and filter signals generated by a controller and make them legible to the engines, to get a self-driving system. The research of these developments is important, because the Mexican companies involved in robotics for the industry sector can be introduced into the competition, consequently boosting the economy of the country.

## Resumen

La inspección robótica es más eficiente para el mantenimiento preventivo en tuberías que la inspección manual, pero los robots actuales tienen dificultades para inspeccionar diámetros variables de tubería y en ambientes explosivos. El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un sistema electrónico para un sistema de tracción implementado en un robot de inspección para trabajar en tuberías que contengan turbosina, teniendo la capacidad de adaptarse en diámetros de tubería de 12 a 18 pulgadas. El robot se clasifica en tres partes; tracción trasera, tracción delantera y el mecanismo de adaptabilidad, donde se instalará un sistema electrónico dentro de cápsulas unidas a los mecanismos que lo controlan. Los controladores son la parte vital para manipular todos los motores en el robot, los controladores entre sí se comunican vía transceptor y al mismo tiempo a una CPU externa, por lo que cada cápsula incluirá uno de ellos para lograr la autonomía. La parte electrónica tendrá el papel de aislar y condicionar las señales digitales desde el controlador hasta la etapa de potencia donde está la mayor parte del consumo de energía a los motores. Los inclinómetros, codificadores, entre otros sensores de retro-alimentación ayudarán a controlar la conducción del robot. Se espera que la electrónica sea capaz de limpiar y filtrar las señales generadas por un controlador y hacerlas legibles a los motores, para obtener un sistema de auto-conducción. La investigación de estos desarrollos es importante, ya que las empresas mexicanas involucradas en robótica para el sector industrial pueden ser introducidas en la competencia, impulsando la economía del país.

|        |   |
|--------|---|
| CIDESI | 4 |
|--------|---|

## Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Agradecimientos</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Resumen</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Índice</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Índice de figuras</b>   | <b>8</b>  |
| <b>Índice de cuadros</b>   | <b>10</b> |
| <b>Introducción</b>  | <b>11</b> |
| <b>Planteamiento del problema</b>  | <b>11</b> |
| <b>Justificación</b>   | <b>12</b> |
| <b>Hipótesis</b>   | <b>12</b> |
| <b>Objetivos</b>   | <b>13</b> |
| Objetivo general . . . . .   | 13        |
| Objetivos específicos . . . . .  | 13        |
| <b>Marco teórico</b>   | <b>14</b> |
| Clasificación de robots inspectores de tuberías . . . . .  | 14        |
| Diagrama de bloques de la arquitectura hardware en robots inspectores de tuberías habituales . . . . . | 15        |
| Arquitecturas de control . . . . .   | 15        |
| Circuitos digitales . . . . .  | 15        |
| Controladores Lógicos Programables . . . . .   | 17        |
| Micro-controladores y Procesadores de señales digitales . . . . .                                      | 17        |

|   |           |
|---|-----------|
| CIDESI  | 5         |
| Sensores . . . . .  | 18        |
| Inclinómetro tipo MEMS (Sistemas micro-electromecánicos) . . . . .                                  | 19        |
| Sensores lineales y rotativos . . . . .   | 19        |
| Actuadores . . . . .  | 20        |
| Servo-motores . . . . .   | 20        |
| Motores a paso . . . . .  | 21        |
| Circuitería para acondicionamiento digital . . . . .  | 22        |
| <b>Estado del arte</b>  | <b>23</b> |
| Descripción de patentes relacionadas a robots de inspección de tuberías . . . . .                   | 23        |
| 4,862,808 Hedgcoxe et al . . . . .  | 23        |
| 6,917,176 Schempf et al . . . . .   | 24        |
| 6,931,149 Hagene et al . . . . .  | 25        |
| 7,182,025 Ghorbel . . . . .   | 25        |
| Comparación de las patentes . . . . .   | 26        |
| Diablo instrumentado . . . . .  | 27        |
| <b>Metodología</b>  | <b>28</b> |
| Selección de componentes . . . . .  | 28        |
| Búsqueda de herramienta de procesamiento . . . . .  | 28        |
| Diseñar circuito electrónico de acondicionamiento para el ajuste de señales y<br>sensores . . . . . | 28        |
| Selección de dispositivos para el circuito electrónico . . . . .                                    | 28        |
| Diseño, cableado y manufactura de la electrónica . . . . .  | 28        |
| Construcción de prototipo electrónico . . . . .   | 28        |
| Evaluación de la electrónica . . . . .  | 29        |
| Diseño de circuito impreso (PCB) . . . . .  | 29        |
| Fabricación de PCB . . . . .  | 29        |
| Aprobación . . . . .  | 29        |

|  |           |
|--|-----------|
| CIDESI   | 6         |
| <b>Recursos</b>  | <b>31</b> |
| Infraestructura y recursos humanos . . . . .                                     | 31        |
| <b>Resultados esperados</b>  | <b>32</b> |
| <b>Desarrollo</b>  | <b>33</b> |
| Selección de controlador . . . . .   | 33        |
| Selección de actuadores . . . . .  | 34        |
| Motor . . . . .  | 34        |
| Selección de sensores . . . . .  | 37        |
| Sensores Hall . . . . .  | 37        |
| Sensores de inclinación . . . . .  | 37        |
| Selección de electrónica de acondicionamiento . . . . .                          | 38        |
| Búfer . . . . .  | 38        |
| Optoacoplador para señales digitales . . . . .                                   | 38        |
| Selección de fuentes de alimentación . . . . .                                   | 39        |
| Diseño de la etapa de electrónica . . . . .                                      | 40        |
| Desarrollo de tarjetas electrónicas PCB . . . . .                                | 41        |
| Diseño de librerías . . . . .  | 41        |
| Diseño de los esquemáticos . . . . .   | 42        |
| Diseño de ruteo PCB . . . . .  | 43        |
| <b>Resultados</b>  | <b>44</b> |
| Pruebas y ensamble de los circuitos impresos manufacturados . . . . .            | 44        |
| Ensamble de los circuitos impresos en el robot . . . . .                         | 46        |
| Pruebas preliminares de sistema de tracción interna de robot de inspección . . . | 47        |
| <b>Conclusiones</b>  | <b>51</b> |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>53</b> |



CIDESI

7

**Anexos**

**56**

### Índice de figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Países productores de petróleo . . . . .  | 12 |
| 2.  | Clasificación de robots para tuberías (a) tipo PIG . (b) Tipo rueda. (c) Tipo oruga. (d) Tipo prensa. (e) Tipo caminante. (f) Tipo gusano. (g) Tipo hélice. . . . . | 14 |
| 3.  | Diagrama de bloques de la arquitectura hardware para un robot inspector de tuberías . . . . .   | 16 |
| 4.  | Estructura de un sensor de inclinación de tipo micro-electromecánico de silicio   | 20 |
| 5.  | Estructura del espacio libre alcanzado . . . . .  | 20 |
| 6.  | a) Un servo-motor con bucle de retro-alimentacion b) Un motor a pasos . . . . .   | 21 |
| 7.  | Electronica de acondicionamiento para un microcontrolador con E/S . . . . .   | 22 |
| 8.  | Robot de la patente . . . . .   | 23 |
| 9.  | Robot de la patente . . . . .   | 24 |
| 10. | Robot de la patente . . . . .   | 25 |
| 11. | Robot de la patente . . . . .   | 25 |
| 12. | Componentes principales del módulo ultrasónico para el diablo inteligente. . . . .  | 27 |
| 13. | Selección de dispositivos electrónicos . . . . .  | 28 |
| 14. | Herramientas para cableado, diseño y fabricación de electrónica . . . . .   | 29 |
| 15. | Diagrama de flujo para el desarrollo electrónico de un sistema de tracción de un robot inspector de tuberías . . . . .  | 30 |
| 16. | Esquemático de la electrónica para el sistema de tracción . . . . .   | 32 |
| 17. | Arranque de un motor DC sin escobillas manipulado por un DSP . . . . .  | 33 |
| 18. | Pruebas de carga y torque de servomotores . . . . .   | 35 |
| 19. | Ajuste del conjunto controlador y motor . . . . .   | 35 |
| 20. | Calibración con el software del controlador . . . . .   | 36 |
| 21. | Respuesta de los servomotores Maxon . . . . .   | 36 |
| 22. | Motor DC y controlador Maxon . . . . .  | 36 |
| 23. | Controlador Maxon . . . . .   | 37 |
| 24. | Sensor inclinómetro aplicado en el posicionamiento del robot . . . . .  | 37 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 25. | Transceptor octal 74HC245D . . . . .  | 38 |
| 26. | Optoacoplador a colector abierto . . . . .  | 38 |
| 27. | Convertidor DC a DC . . . . .   | 39 |
| 28. | Filtro para convertidor DC a DC . . . . .   | 39 |
| 29. | Diagrama a bloques del nuevo diseño conceptual del sistema de tracción interna  | 40 |
| 30. | Diseño de una librería, en la izquierda se visualiza el PCB y en la derecha el<br>esquemático . . . . .   | 41 |
| 31. | Ambito esquemático de un PCB . . . . .  | 42 |
| 32. | (a) control y acondicionamiento digital (b) Acondicionamiento analógico (c)<br>Fuentes de alimentación (d) Conexiones para controladores de motor . . . .                                   | 43 |
| 33. | Comparación del ensamble de circuitos integrados en el circuito impreso, pro-<br>totipo 1: manufacturado en CIDESI, prototipo 2: manufacturado por externos                                 | 44 |
| 34. | Pruebas de control de motores en el Sistema de tracción . . . . .   | 45 |
| 35. | Pruebas de las señales de filtración analógica con el conjunto de circuitos<br>impresos ensamblados uno sobre otro mediante pines . . . . .   | 45 |
| 36. | (a) control y acondicionamiento digital (b) Acondicionamiento analógico (c)<br>Fuentes de alimentación (d) Conexiones para controladores de motor (e) con-<br>troladores de motor . . . . . | 46 |
| 37. | Tarjeta de control dentro de capsula de protección . . . . .  | 46 |
| 38. | Pruebas preliminares de tracción interna a medio tubo . . . . .   | 47 |
| 39. | Pruebas preliminares de tracción interna tubo completo . . . . .  | 48 |
| 40. | Pruebas preliminares de tracción interna tubo completo observando su incli-<br>nación y su velocidad de avance . . . . .  | 49 |
| 41. | Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI . . . . .  | 49 |
| 42. | Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI sumergido en<br>aceite di eléctrico . . . . .  | 50 |
| 43. | Cronograma de actividades . . . . .   | 56 |

**Índice de cuadros**

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Arquitecturas de control . . . . .  | 18 |
| 2. | Comparacion de patentes relacionados con robotica para inspeccion de tuberias | 26 |
| 3. | Comparación de los robots de inspección . . . . .                             | 34 |
| 4. | Comparación de los robots de inspección . . . . .                             | 51 |

## Introducción

Las tuberías son una herramienta importante para trasladar sustancias de un punto a otro. Muchos tipos de tuberías se utilizan para la construcción de líneas de suministro donde es transportada agua y gas que son sustancias vitales en nuestra sociedad contemporánea. También las tuberías se utilizan extensamente en industrias químicas y en países del golfo para transportar gasolina, diésel, aceite, etc (Atul A. Gargade1, 2016). Pero últimamente se están produciendo muchos problemas en las tuberías debido a la corrosión, las deformaciones y otros factores dañinos. Por lo tanto, una inspección programada debe hacerse para detectar dónde se han formado estos defectos (Fujiwara, Kanehara, Okada, y Sanemori, 1993). Las condiciones dentro de las tuberías se pueden ubicar a través de dispositivos de detección, como cámaras, sensores de infrarrojos y sensores de ultrasonidos. Sin embargo, las tuberías no siempre se encuentran por encima del suelo (Choi y Jung, 2006), (Mamdani, 1974). A veces incluso se encuentran en lugares que no se pueden acceder fácilmente (Nassiraei, Kawamura, Ahrary, Mikuriya, y Ishii, 2007). Además, la geometría del tubo puede variar y, por lo tanto, esto dificulta la inspección (Huang, Yan, y Cheng, 2010). Teniendo en cuenta los requisitos y limitaciones, se propone un robot de inspección de tuberías debidamente diseñado con un sistema electrónico adecuado.

## Planteamiento del problema

Los robots de inspección actuales tienen dificultades para navegar en el diámetro variable de la tubería y dependen del flujo dentro de la tubería para moverse debido a las limitaciones en el mecanismo y la electrónica. En consecuencia, el robot está expuesto a posibles obstrucciones. En este proyecto se considera que el robot trabajará en una tubería que contiene turbosina, entonces se debe tener en cuenta un entorno explosivo. Si la electrónica no se considera para ambientes explosivos, puede ocurrir una explosión poniendo en riesgo vidas humanas. Por lo tanto, la electrónica tiene que cumplir con los estándares para equipos a prueba de explosión dentro de la norma ATEX (ATmospheres EXplosives) (Subrmaniam y Rai, 2013).

## Justificación

México es uno de los mayores productores de petróleo del mundo, y se necesitan tuberías para su transporte (Eia.gov, 2017). Entonces el mantenimiento preventivo en tuberías es más exigente con el paso del tiempo, pero los actuales sistemas de inspección en nuestro país no son los apropiados para este sector. Precisamente por eso México está pidiendo soluciones extranjeras a las empresas que están involucradas en la inspección de tuberías. Por lo tanto esto puede ser terminado si las compañías locales que trabajan sobre esta área existieran. CIDESI®, una empresa mexicana, está llevando a cabo el desarrollo de proyectos para aumentar la economía del país. La robótica que cumple con los requisitos mencionados anteriormente está pensada, pero es esencial la integración de la electrónica para permitir al robot navegar a través de las tuberías con un sistema de auto-conducción.

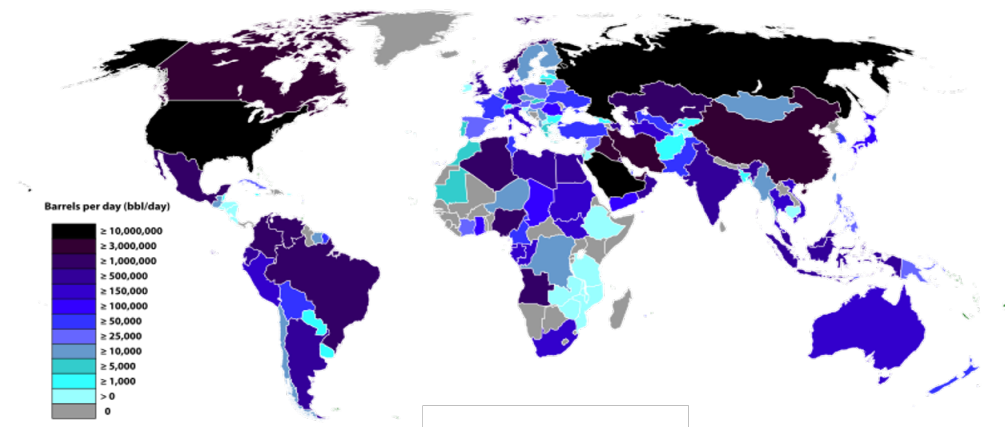


Figura 1. Países productores de petróleo

## Hipótesis

Si se fabrica una electrónica con las funciones de amplificación, filtrado y aislamiento de señales desde un procesador digital, es posible controlar los motores conectados a los mecanismos del robot de inspección logrando la adaptabilidad del diámetro de la tubería en un rango específico, esto debido a la lectura correcta de las señales eléctricas que recibe el controlador que manipula directamente de los motores del mecanismo de tracción.

## Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar una etapa de acondicionamiento electrónico para ajustar las señales de un controlador y sensores de retro-alimentación para luego habilitarlos en los controladores que manipulan los motores acoplados a los mecanismos.

### Objetivos específicos

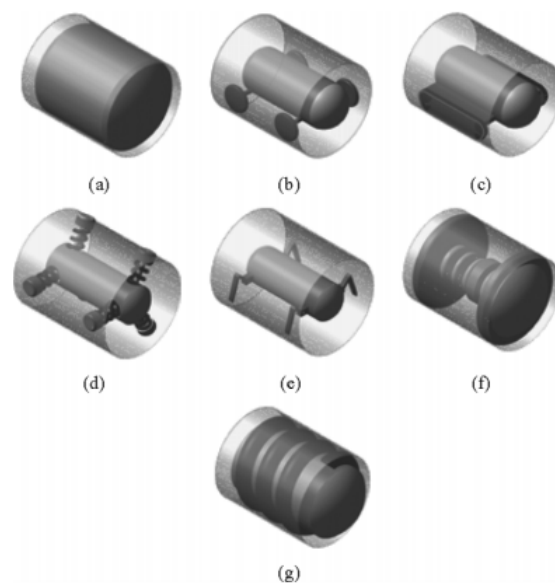
Los objetivos específicos para este proyecto son los siguientes:

1. Buscar una herramienta de procesamiento capaz de controlar los motores
2. Diseñar la etapa de acondicionamiento electrónico para ajustar las señales del controlador.
3. Buscar componentes y dispositivos electrónicos para el desarrollo del sistema de tracción.
4. Construir el circuito del prototipo.
5. Comprobar que cada señal que pasa por la etapa de acondicionamiento o la fuente de alimentación tiene un comportamiento adecuado.
6. Diseñar placa de circuito impreso (PCB) en un software de plataforma para diseño electrónico.
7. Enviar un archivo de PCB con un fabricante para su manufactura.
8. Montaje y ensamble de la placa de circuito impreso.
9. Probar el circuito electrónico ensamblado en el robot.

## Marco teórico

### Clasificación de robots inspectores de tuberías

Los robots para tubería, que tienen una larga historia de desarrollo en robótica, se pueden clasificar en varias formas elementales de acuerdo con los patrones de movimiento, como se muestra en la figura 2, aunque la mayoría de ellos han sido diseñados dependiendo de las aplicaciones específicas. (Roh y Choi, 2005)



*Figura 2.* Clasificación de robots para tuberías (a) tipo PIG . (b) Tipo rueda. (c) Tipo oruga. (d) Tipo prensa. (e) Tipo caminante. (f) Tipo gusano. (g) Tipo hélice.

Como se muestra en la Fig.2 (a), por ejemplo, el tipo PIG(Pipe In-line Gauge) es uno de los más conocidos comerciales, que es impulsado pasivamente por la presión del fluido dentro de las tuberías. Se ha empleado para la inspección de tuberías con grandes diámetros (Okamoto, Adamowski, Tsuzuki, Buiochi, y Camerini, 1999). El tipo de rueda ilustrado en la Fig.2 (b) es similar al robot simple móvil, y hasta el momento se ha informado de una serie de robots comercializados (Okada y Kanade, 1987). Fig.2 (c) muestra el robot con orugas en lugar de ruedas (Roman, Pellegrino, y Sigríst, 1993). Como se muestra en la Fig.2 (d), el tipo de prensa de pared, que tiene una serie de ventajas en la escalada de tuberías verticales, corresponde al robot con un mecanismo flexible para presionar la pared con los medios



que apliquen (Ryew y cols., 2000). Como se muestra en la Fig.2 (e), el de tipo caminante posee patas articuladas que puede producir movimientos altamente sofisticados (Neubauer, 1994). El tipo de gusano que se ve en la Fig.2 (f) se emplea normalmente para tuberías con diámetros muy pequeños (Fukuda, Hosokai, y Uemura, 1989). El tipo de tornillo (o tipo de impulsión helicoidal) muestra el movimiento de un tornillo cuando avanza en las tuberías, como se muestra en la Fig.12 (g) (Hayashi y Iwatuki, 1998).

### **Diagrama de bloques de la arquitectura hardware en robots inspectores de tuberías habituales**

Con referencia ahora a la Fig.3, se muestra un diagrama de bloques de la arquitectura de hardware para la realización de un robot de inspección de tuberías. El hardware incluye un sistema operativo en tiempo real, un módulo de gestión de base de datos, un módulo de programa de control maestro, un módulo de detección y resolución de fallas, un módulo de navegación, un módulo de gestión de sensores, un módulo de control de motor de accionamiento y un módulo de control de herramientas. El sistema operativo en tiempo real crea el entorno para que el resto de módulos funcionen.

### **Arquitecturas de control**

Muchos sistemas mecatrónicos tienen múltiples entradas y salidas relacionadas por deterministas que resultan en alguna forma un control de las salidas. Un diseñador puede elegir entre un amplio espectro de arquitecturas de control, que van desde el simple control de bucle abierto hasta el control de retroalimentación complejo. La implementación del control puede ser tan simple como usar un solo amplificador operacional o tan complicado como programar microprocesadores masivamente paralelos. Aquí, describimos una jerarquía de enfoques de control básico que puede considerar en el diseño de un sistema mecatrónico.

**Circuitos digitales.** Si las señales de entrada son digitales o pueden convertirse en un conjunto finito de estados, entonces los controladores lógicos secuenciales pueden ser fáciles de implementar en un diseño mecatrónico. Los diseños más simples utilizan algunos chips

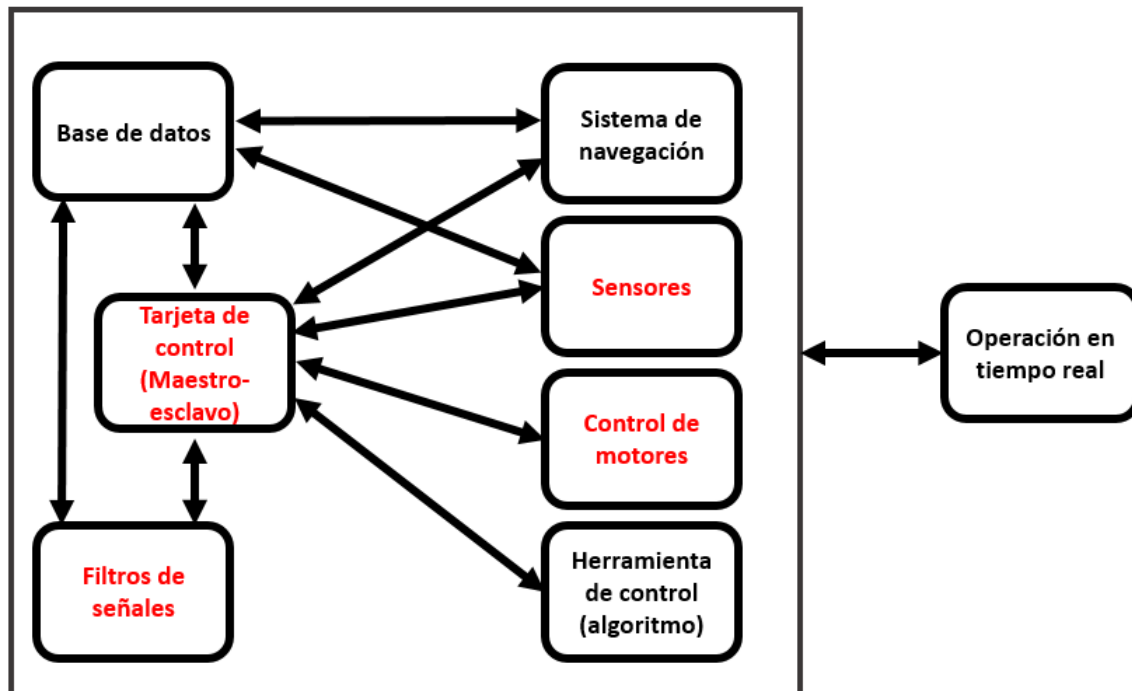


Figura 3. Diagrama de bloques de la arquitectura hardware para un robot inspector de tuberías

digitales para crear un controlador digital. Para generar funciones booleanas complejas en un solo IC, dispositivos digitales especializados como controladores de lógica programable (PAL) y arreglos lógicos programables (PLA) se pueden utilizar para reducir la complejidad del diseño. PALs y PLA contienen muchas compuertas y una matriz de conductores que se pueden conectar de forma personalizada mediante una programación dispositivo. Una vez programados, los circuitos integrados implementan la función booleana diseñada entre las entradas y las salidas. PALs y PLAs pueden ofrecer una alternativa a los complejos secuenciales y combinacionales que requieren muchos circuitos integrados. Otro tipo de dispositivo lógico basado en la puerta programable es el campo programable de matriz de compuertas (FPGA). Al igual que los PALs y los PLA, un FPGA contiene un gran número de puertas reconfigurables que se pueden programar para crear un amplio rango de funciones lógicas. Los FPGAs son diferentes de PALs y PLAs porque también pueden incluir memoria, puertos de E/S, funciones aritméticas y otras funciones encontradas en microcontroladores. Además, los FPGA se programan generalmente con un nivel alto lenguaje de software (por

ejemplo, VHDL) que permite una funcionalidad bastante sofisticada.

**Controladores Lógicos Programables.** Los controladores lógicos programables (PLC) son dispositivos industriales con interfaz y control de dispositivos analógicos y digitales. Están diseñados con un pequeño conjunto de instrucciones adecuado para aplicaciones de control industrial. Por lo general la programación con lógica de escalera, es un método gráfico de conectividad y lógica entre entradas y salidas del sistema. Los PLC están diseñados para el control industrial y los ambientes industriales específicamente. Por lo tanto, además de ser flexibles y fáciles de programar, son robustos y relativamente inmunes a interferencias externas.

**Micro-controladores y Procesadores de señales digitales.** El micro-controlador, que es un micro-ordenador en un solo IC, proporciona una pequeña plataforma de control flexible que se puede incrustar fácilmente en un sistema mecatrónico. El micro-controlador se puede programar para realizar una amplia gama de tareas de control. Diseñar con los micro-controladores requiere generalmente el conocimiento de un idioma de programación de alto nivel (por ejemplo, C o Basic) o lenguaje ensamblador y experiencia en la interfaz digital y analógica.

Otro tipo de dispositivo de microcomputador de IC único es un **procesador de señal digital (DSP)**. Un DSP puede tener una funcionalidad similar a la de un microcontrolador, pero los DSPs suelen ser más adecuados para los cálculos de punto flotante de alta velocidad. Los DSP son útiles en aplicaciones de comunicación, audio/video y control donde el cálculo rápido de filtros digitales y sumas ponderadas es importante para ciclos rápidos. (Alciatore y Histan, 2003)

Cuadro 1  
*Arquitecturas de control*

| Controlador                     | Ventajas  | Desventajas   |
|---------------------------------|---|---|
| FPGA (Wakerly, 2001)            | Alta velocidad de procesamiento   | Programación compleja, La mayoría de sus recursos son desperdiciadas en su aplicación, Su electrónica es compleja |
| PLC (Bishop, 2005)              | Fácil programación, accesible, Alta memoria, Alta velocidad de procesamiento, robusto     | Requiere mucho espacio y de otras unidades para habilitar sus salidas y entradas                                  |
| Microcontrolador (Dunn, 2005)   | Económico, accesible  | Baja velocidad de procesamiento, baja memoria   |
| DSP (Dunn, 2005)                | Alta velocidad de procesamiento suficientes entradas y salidas digitales y multifuncional | Configuración y circuitería compleja  |
| Microprocesador (Kaushik, 2010) | Alta velocidad de procesamiento y multifuncional  | Son caros y tienen a sobrecalentarse  |

## Sensores

El sensor es un dispositivo que cuando se expone a un fenómeno físico (temperatura, desplazamiento, fuerza, etc.) produce una señal de salida proporcional (eléctrica, mecánica, magnética, etc.). El término transductor es a menudo utilizado sinónimo de sensores. Sin embargo, idealmente, un sensor es un dispositivo que responde a un cambio en el fenómeno físico. Por otro lado, un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra forma de energía. Los sensores son transductores cuando detectan una forma de entrada de energía y la salida en una forma diferente de energía. Por ejemplo, un termopar responde a un cambio de temperatura (Energía térmica) y produce un cambio proporcional

en la fuerza electromotriz (energía eléctrica). Por lo tanto, Un termopar puede llamarse sensor y / o transductor. (Bishop, 2005)

**Inclinómetro tipo MEMS (Sistemas micro-electromecánicos).** Los sensores inclinómetros son utilizados para medir gradientes del portador, y adquirir señales de entrada mediante una plataforma ajustable. Estos son aplicados en diversos campos, como en la comunicación en productos electrónicos, juguetes y equipos electromecánicos, también en automóviles, tanques, barcos, robos y misiles. (G.R., 1985)

El sensor de inclinación de tipo micro-electromecánico de silicio está compuesto por una masa de papilionáceas y cuatro bigas de silicio a tensión en forma de cruz, mostrado en la Fig. 4. Cuando el sensor es inclinado, el estado de tensión de la viga de silicio es modificada, cuales valores varían con diferente oblicuidad, así que la oblicuidad es medida con su correspondiente piezo-resistencia. Las cuatro piezo-resistencias en cualquiera de los dos pares de vigas constituyen un puente, el cambio de resistencia es directamente proporcional al esfuerzo neto, y el esfuerzo neto es relativo a la oblicuidad del sensor, así que la oblicuidad en el eje de dirección puede ser alcanzada. La Fig.5 muestra la estructura del espacio libre alcanzado grabado por ICP (International Center Photographic). (Senturia, 2004)

**Sensores lineales y rotativos.** Los sensores de posición lineal y rotacional son dos de las más fundamentales de todas las mediciones utilizadas en un sistema mecatrónico típico. En general, los sensores de posición producen una salida eléctrica proporcional al desplazamiento que experimentan. Existen sensores de tipo de contacto como medidor de tensión, LVDT, RVDT, tacómetro, etc. El tipo sin contacto incluye codificadores, efecto de hall, capacitancia, inductancia e interferómetro. También se pueden clasificar en función del rango de medición. Por lo general, los sensores de alta resolución, como los de efecto Hall, de inductancia por fibra óptica y de capacitancia son adecuados para un rango muy pequeño (normalmente de 0,1 mm a 5 mm). Los transformadores diferenciales, por otro lado, tienen un rango mucho mayor con buena resolución. Los sensores tipo interferómetro proporcionan tanto una alta resolución (en términos de micras) como una amplia gama de

mediciones (normalmente hasta un metro). Sin embargo, los sensores tipo interferómetro son voluminosos, caros y requieren un gran tiempo de configuración. (Bishop, 2005)

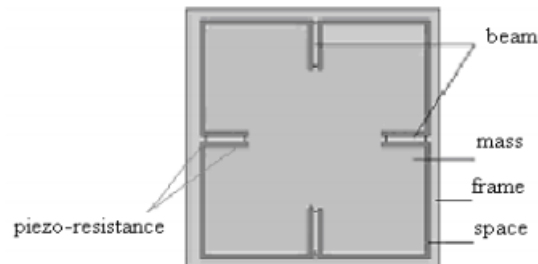


Figura 4. Estructura de un sensor de inclinación de tipo micro-electromecánico de silicio

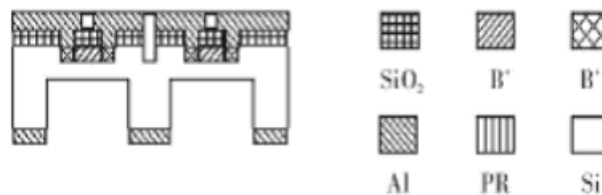


Figura 5. Estructura del espacio libre alcanzado

## Actuadores

Los actuadores son básicamente el músculo detrás de un sistema mecatrónico que acepta un comando de control (sobre todo en forma de señal eléctrica) y produce un cambio en el sistema físico generando fuerza, movimiento, calor, flujo, etc. Normalmente se utilizan los actuadores en combinación con la fuente de alimentación y un mecanismo de acoplamiento. La unidad de potencia proporciona corriente alterna o continua a la tensión y corriente nominal. El mecanismo de acoplamiento actúa como la interfaz entre el actuador y el sistema físico. Mecanismos típicos incluyen cremallera y piñón, transmisión por engranaje, transmisión por correa, tornillo sin fin y tuerca, pistón y conexiones. (Bishop, 2005)

**Servo-motores.** Los servomotores pueden girar a una posición dada, detenerse e invertirse. En el caso de un servomotor, la posición angular y la velocidad pueden controlarse con precisión mediante un servo-bucle, que utiliza la retroalimentación de la salida a la entrada. La Fig.6 (a) muestra dicho sistema. La posición del árbol de salida es monitorizada

por un potenciómetro que proporciona una tensión de realimentación analógica a la electrónica de control (un disco de codificación se usaría en un sistema digital), de manera que la electrónica de control pueda usar esta información para alimentar el motor de salida y parar en cualquier posición deseada o invertir el motor para detenerse en cualquier posición deseada. (Dunn, 2005)

**Motores a paso.** Los motores a paso giran en un ángulo fijo con cada impulso de entrada. El rotor es normalmente un imán fijo con varios polos y un estator con varios devanados. Ocho polos magnéticos y un estator de seis secciones se muestran en la Fig. 6 (b). Los motores a paso están disponibles en muchos diseños diferentes con una amplia selección del número de polos y requisitos de accionamiento, todos estos definen las características del motor a paso y el ángulo de rotación para cada fase de entrada. Los motores a paso se pueden invertir cambiando la secuencia de las fases de conducción. Los motores a paso están disponibles con ángulos de escalonamiento de 0,9, 1,8, 3,6, 7,5, 15 y 18 grados. Puesto que el motor avanza un ángulo conocido con cada impulso de entrada, no se requiere retroalimentación. Sin embargo, como sólo se conoce la posición relativa, la pérdida de potencia provocará la pérdida de información de posición, de manera que en un sistema que utiliza motores a paso se requiere normalmente una referencia de posición. (Dunn, 2005)

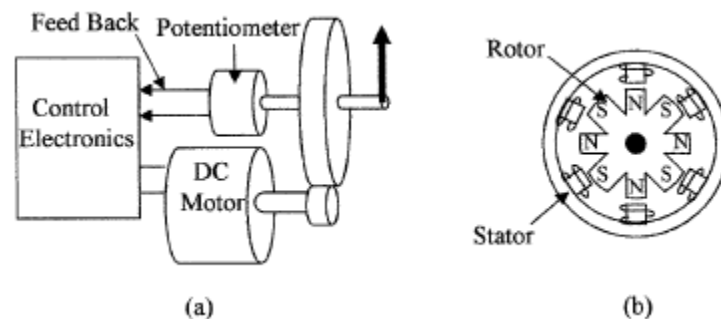


Figura 6. a) Un servo-motor con bucle de retro-alimentacion b) Un motor a pasos

### Circuitería para acondicionamiento digital

Todas las señales deben pasar por los búferes de acondicionamiento o compuertas cuando hay alguna preocupación sobre la calidad de la señal. Las clavijas del microcontrolador están en una condición de alta impedancia cuando se programan como entradas y aceptarán cualquier señal TTL (transistor-transistor logic) o CMOS, por lo que la tarea en cuestión es convertir la señal entrante en una señal de nivel TTL o una señal de nivel CMOS. Las señales flotantes que entran en las entradas flotantes deben tener una resistencia de pull-up (10 a 100k ohmios) en el pin para atar el pasador alto. Los aisladores ópticos pueden utilizarse para aislar eléctricamente la señal ruidosa del microcontrolador cuando sea necesario. Si tiene un aislador disponible, úselo. Los diagramas de las Figuras (a), (b) y (c) muestran varias técnicas que pueden usarse. (Sandhu, 2009)

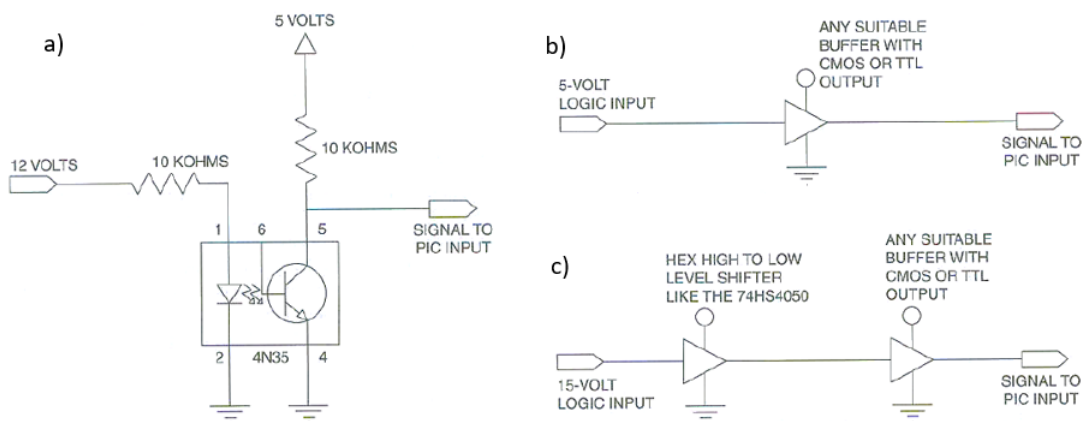


Figura 7. Electronica de acondicionamiento para un microcontrolador con E/S



### Estado del arte

#### Descripción de patentes relacionadas a robots de inspección de tuberías

**4,862,808 Hedgcoxe et al.** Un dispositivo de arrastre de tuberías robótico comprende dos módulos de tres ruedas conectados de forma pivotante en sus centros, teniendo cada uno una rueda loca y dos ruedas accionadas. Cada módulo comprende un yugo intermedio y un chasis de yugo de cadena de transmisión con placas laterales rectangulares paralelas separadas lateralmente, estando fijadas las placas laterales locas en un extremo al chasis y la rueda loca montada en el otro extremo. Las placas laterales de la transmisión están fijadas al chasis y las ruedas motrices están montadas giratoriamente una en cada extremo. Un motor en cada extremo del chasis pivota los módulos con ruedas independientemente dentro y fuera de una posición de acoplamiento de rueda en el interior del tubo y un motor de accionamiento llevado por el yugo de transmisión acciona las dos ruedas motrices en direcciones opuestas para propulsar el dispositivo.

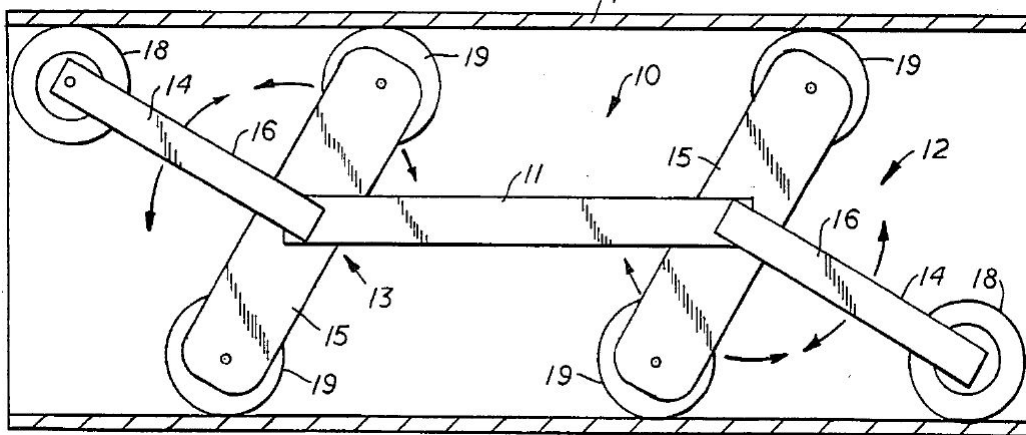
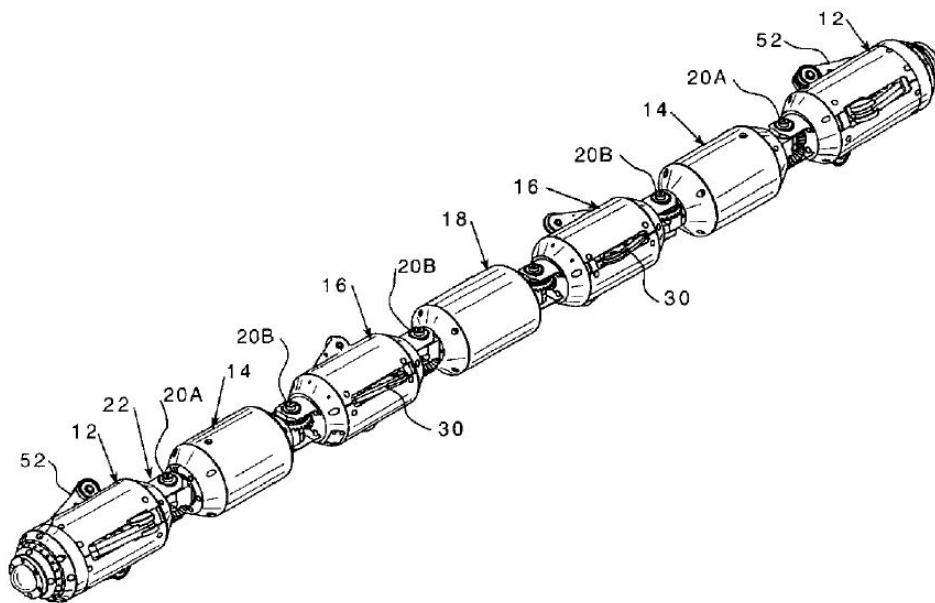


Figura 8. Robot de la patente

**6,917,176 Schempf et al .** Esta invención proporciona un sistema de inspección de tuberías sin distanciamiento y de largo alcance que incluye un tren autopropulsado que tiene una pluralidad de módulos; elementos de unión para interconexión de módulos adyacentes, componentes de lectura de datos y componentes de comunicación inalámbrica para transmitir datos recogidos y recibir mensajes de control. El módulo-tren incluye, generalmente, al menos uno, y preferiblemente dos módulos de accionamiento, al menos un módulo de potencia y un módulo electrónico. El tren puede incluir adicionalmente al menos un módulo de soporte, que puede estar interpuesto entre los módulos de potencia y electrónica.



*Figura 9.* Robot de la patente

**6,931,149 Hagene et al.** Más concretamente, la invención se refiere al tema de lo que se llama tradicionalmente un dispositivo de calibre interno de tubería o dispositivo PIG que puede ser insertado y desplazado por la presión de fluido para inspeccionar el lado interior de la pared de tubería para detectar defectos de varios tipos, como por ejemplo la corrosión, depósitos, erosión o falla mecánica.

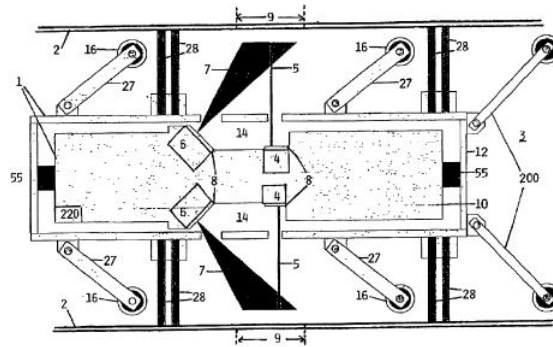


Figura 10. Robot de la patente

**7,182,025 Ghorbel.** La especificación describe un robot para inspección adaptado para recorrer distancias virtualmente ilimitadas a través de espacios cerrados de pequeño diámetro tales como conductos o conductos, preferiblemente utilizando un sistema de propulsión de tipo helicoidal . El robot incluye preferentemente una pluralidad de ruedas inclinadas en un ángulo mayor que cero grados y menos de noventa grados con respecto al eje longitudinal de la tubería, una pluralidad de ruedas alineadas en paralelo al eje longitudinal de la tubería, y un sistema de potencia para provocar la rotación relativa de las secciones que soportan las ruedas inclinadas y no acodadas.

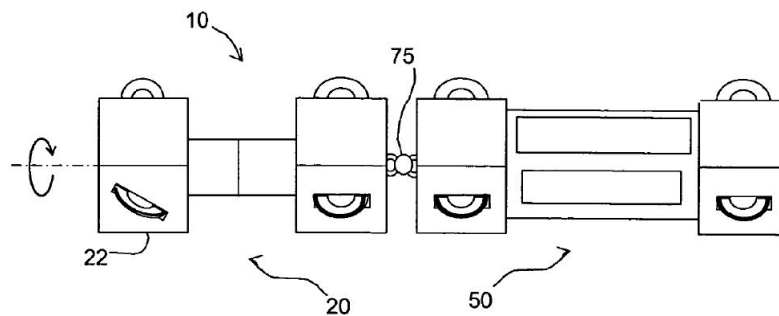


Figura 11. Robot de la patente

## Comparación de las patentes

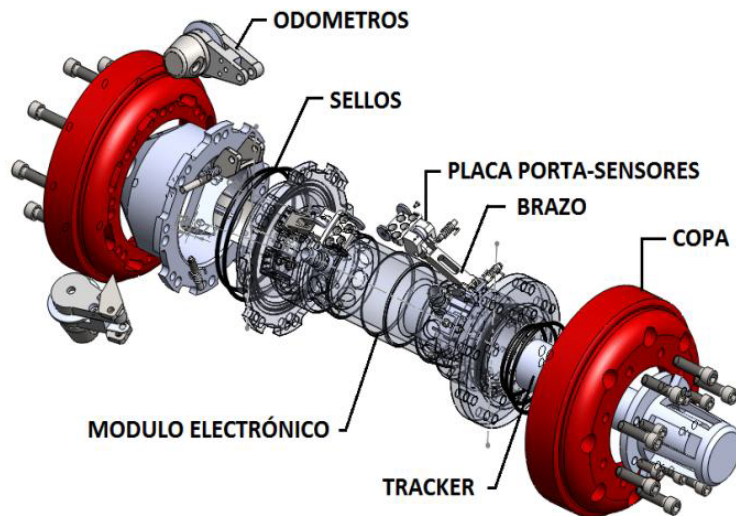
Cuadro 2

*Comparacion de patentes relacionados con robotica para inspeccion de tuberias*

| Patente   | Tipo             | Auto-impulsado | A prueba de explosión | Adaptabilidad | Controlador             |
|---|------------------|----------------|-----------------------|---------------|-------------------------|
| 4,862,808 Hedgcoxe et al (Hedgcoxe y Zinsmeyer, 1989)               | Tipo rueda       | No             | No                    | No            | Desconocido             |
| 6,917,176 Schempff et al (Schempff, Mutschler, y Goltsberg, 2005)   | Tipo gu-sano     | Si             | Si, gas natural       | No            | Procesador Hitachi SH4r |
| 6,931,149 Hagene et al (Hagene, Haugholt, Tørring, y Vartdal, 2005) | Tipo PIG         | No             | Si, gas natura        | No            | FPGA                    |
| 7,182,025 Ghorbel et al (Ghorbel y Dabney, 2007)                    | Tipo Heli-coidal | Si             | Si                    | No            | Micro-procesador        |

En la tabla 2 se comparan algunas patentes sobre robots de inspección, donde todos ellos no cumplen con las características de ser un sistema intrínsecamente seguro y autónomo debido a su mecanismo y electrónica. Entonces se está desarrollando localmente un prototipo con todas estas características, pero este prototipo necesita algunas mejoras, se discutirá en la siguiente sección.

**Diablo instrumentado.** El Diablo Instrumentado (Rubio González C., 2010), una herramienta de inspección desarrollada por CIDESI, consiste en un robot basado en un FIG. Sin embargo, este robot no puede navegar en diferentes diámetros de tubería y sin una sustancia que fluye a través de ella, por lo tanto, carece de un sistema de conducción auto-suficiente. Por lo consiguiente, el Diablo Instrumentado está siendo modificado con la adición de nuevos mecanismos los cuales son dos tractores, tracción delantera y trasera. En consecuencia, se requerirán diferentes sistemas electrónicos para controlar los motores conectados al mecanismo agregado recientemente.



*Figura 12.* Componentes principales del módulo ultrasónico para el diablo inteligente.

## Metodología

### Selección de componentes

**Búsqueda de herramienta de procesamiento.** Anteriormente se ve en la tabla 1, una variedad de herramientas de procesamiento, la tarea en esta sección es elegir el mejor controlador, esto está determinado por su velocidad de procesamiento y su accesibilidad. Un ejemplo de una herramienta de procesamiento se da en la Fig. Ref pic8 (a).

**Diseñar circuito electrónico de acondicionamiento para el ajuste de señales y sensores.** La implementación de un circuito de acondicionamiento usando tecnología TTL o CMOS para amplificar, aislar y filtrar, como se ve en la Fig.7, limpia y emite señales sin ruido eléctrico. Para optimizar el espacio en las placas de circuito es una buena opción tener en cuenta la tecnología SMD (Surface Mount Devices) en el circuito de la etapa de acondicionamiento Fig.13 (b).

**Selección de dispositivos para el circuito electrónico.** Al elegir dispositivos electrónicos, esto se determinara dependiendo de las variables del entorno en el que el robot de inspección trabajará, como por ejemplo, los rangos de voltaje y corriente que se permitirán en el robot.

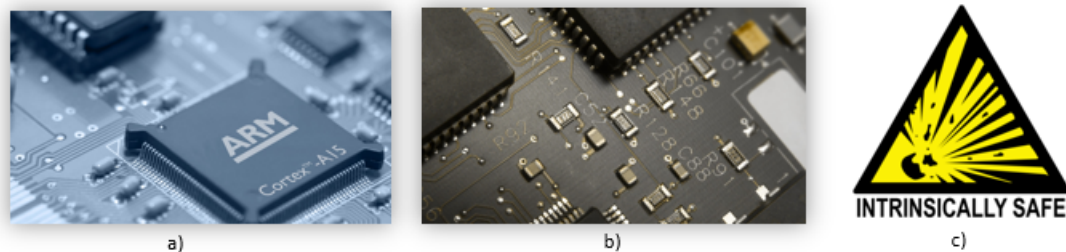


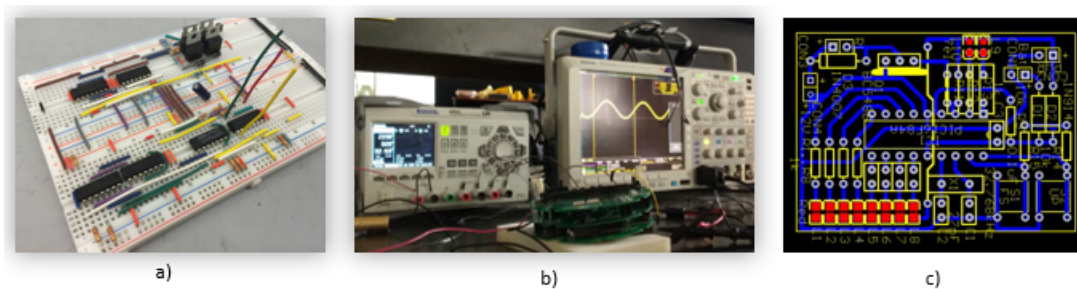
Figura 13. Selección de dispositivos electrónicos

### Diseño, cableado y manufactura de la electrónica

**Construcción de prototipo electrónico.** El "protoboard" es una herramienta utilizada para construir prototipos electrónicos. Antes de la fabricación, es mejor probar circuitos en estos tableros didácticos para asegurar el funcionamiento correcto, véase la Fig.14 (a).

**Evaluación de la electrónica.** Es importante tomar pruebas de señal antes de la fabricación. Si una etapa electrónica no entrega los parámetros correctos durante la prueba, como el umbral de voltaje, se podrían realizar algunos cambios en el prototipo. La Fig. 14 (b) muestra un osciloscopio, este dispositivo puede tomar muestras de señales eléctricas.

**Diseño de circuito impreso (PCB).** Hay muchas herramientas de diseño en presentación de software que nos permitirán diseñar un PCB de una manera fácil de acuerdo con las normas de diseño y control de calidad, ver Fig. 14 (c).



*Figura 14.* Herramientas para cableado, diseño y fabricación de electrónica

**Fabricación de PCB.** Cuando se termine el PCB, el diseño será enviado con un experto para fabricar cada circuito.

**Aprobación.** Finalmente todos los circuitos serán ensamblados al robot de inspección, cableando las entradas y salidas de PCB a los motores, y posteriormente será puesto en marcha.

Paso a paso, el siguiente diagrama de flujo explica la metodología de una manera más visual, algunas retroalimentaciones se consideran en caso de que en alguna etapa ocurra un error.

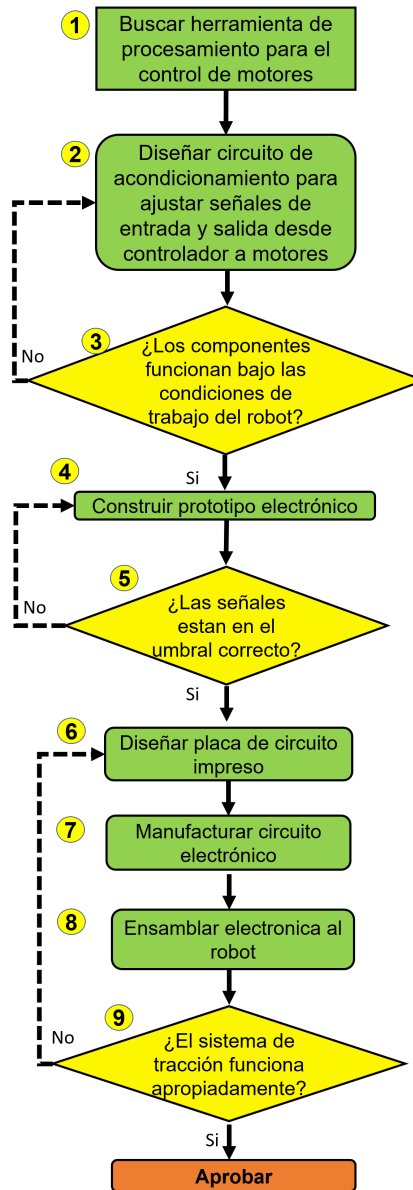


Figura 15. Diagrama de flujo para el desarrollo electrónico de un sistema de tracción de un robot inspector de tuberías



## Recursos

La empresa externa que solicita el robot de inspección es A.S.A (Aeropuertos y Servicios Auxiliares), en esta empresa se presta para realizar el mantenimiento preventivo debido al uso frecuente de sus tuberías para suministrar combustible a los aviones. Así es como CIDESI ofrece sus servicios a esta empresa. Una empresa mexicana como CIDESI, lleva a cabo este tipo de desarrollo de proyectos, pero se requiere financiamiento; El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) apoya con los recursos económicos para poner en marcha este proyecto.

### Infraestructura y recursos humanos

A continuación se muestra cada participante y su rol en este proyecto.

- **Cliente:** A.S.A
- **Empresa responsable:** CIDESI
- **Financiamiento:** CONACYT
- **Departamento:** Energías
- **Area y personal:** Laboratorio de robótica e inspección y laboratorio de equipos instrumentados.

## Resultados esperados

El esquema representado en la Fig. 16 muestra todas las etapas de la electrónica de conducción, desde los controladores hasta los motores, donde en cada recuadro está implícita una funcionalidad. Los controladores envían señales a la etapa de acondicionamiento, por lo que las señales de salida estarán de manera limpia y filtrada, entonces los controladores toman las señales, se transforman en señales legibles para los motores de la electrónica de potencia, porque sin esta transformación, el consumo de energía de los motores dañaría la etapa de acondicionamiento y; de la misma manera, los micro-controladores. Se requiere una señal de retroalimentación desde los motores y sensores de navegación para disminuir el error gracias a la ejecución de algoritmos de control en los micro-controladores y así enviar una nueva señal a los motores. En conclusión, el ajuste del error es importante para adaptar el robot a los cambios de diámetro del tubo.

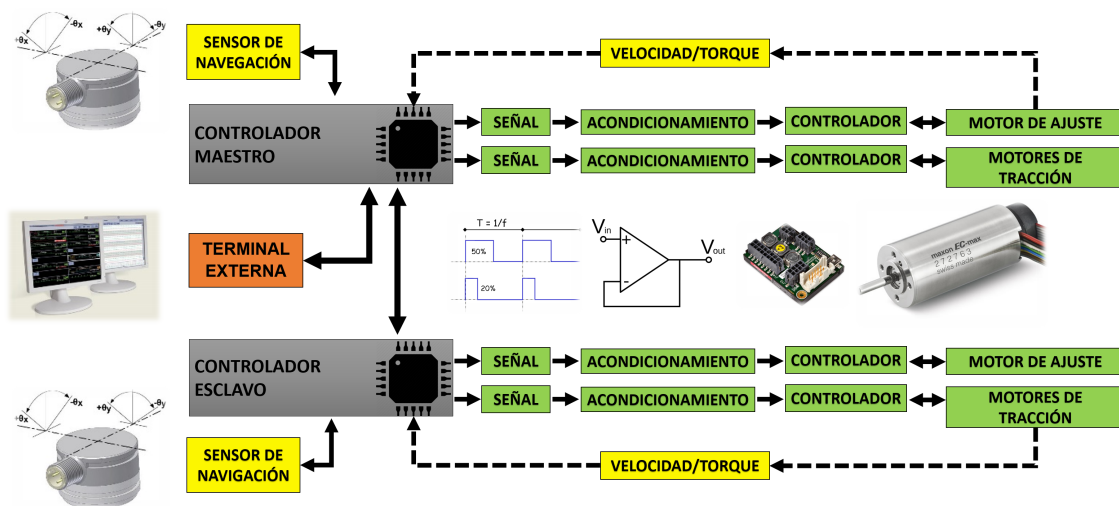


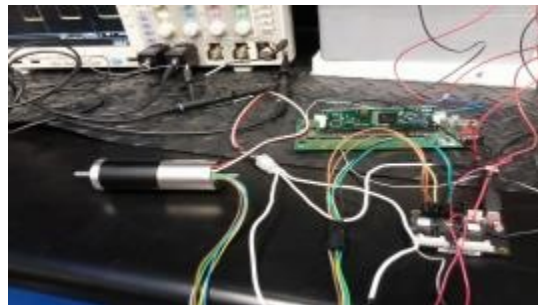
Figura 16. Esquemático de la electrónica para el sistema de tracción

## Desarrollo

Este es el sistema que se encarga de dar el apropiado movimiento al robot de inspección dentro de la tubería subterránea de turbosina, controlando el avance y posición de sus 2 tractores de tracción, así como la adaptación de los tractores y del sistema de transductores a tuberías de 12 y 18 pulgadas. Para lo cual cuenta con servomotores eléctricos de tipo brushless (sin escobillas) en cada tractor, acoplados a sus ruedas de tracción y a su sistema de apertura y cierre, además cuenta con un motor más para la apertura y cierre del sistema de transductores. Estos actuadores eléctricos serán controlados por un sistema electrónico que está basado en un procesador digital de señales DSP.

### Selección de controlador

El control para el sistema de tracción estará en un procesador de señales digitales (DSP), se eligió este controlador debido a que puede ejecutar hasta 150 millones de instrucciones por segundo, añadiendo su procesamiento en paralelo de instrucciones y a su arquitectura multi-bus, así que la electrónica estará diseñada alrededor de este procesador. En la siguiente figura se muestra evidencia de las pruebas que se realizaron para el desarrollo de la electrónica necesaria para controlar al robot de inspección a través de los servomotores.



*Figura 17.* Arranque de un motor DC sin escobillas manipulado por un DSP

### Selección de actuadores

**Motor.** Cabe destacar en la selección de actuadores se debe tener cierta cautela debido a los ambientes explosivos, por lo que se tomo en consideración un motor de corriente directa (DC) sin escobillas, ya que si se utilizan motores con escobillas, estos al momento de su funcionamiento se genera una fricción entre las escobillas y el colector provocando desgaste y a la vez chispa. En esta etapa se han desarrollado distintas pruebas dirigidas principalmente a la selección y control de los motores. Las pruebas preliminares de la integración de los motores en el sistema de tracción representan un avance significativo, tomando en cuenta que el funcionamiento y desempeño de los componentes como son: el controlador y el motor DC fueron satisfactorios; los parámetros de estos componentes han sido corroborados con las pruebas de fuerza y torque de estos motores, con diferentes pesos, ver siguiente tabla:

Cuadro 3

*Comparación de los robots de inspección*

| No. de prueba | Peso aprox.<br>(kg) | Distancia<br>alcanzada (m) | Corriente (A) |
|---------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| 1             | 2                   | 1                          | 0.5           |
| 2             | 5                   | 1                          | 0.5           |
| 3             | 10                  | 1                          | 0.8           |
| 4             | 20                  | 0.8                        | 2.5           |

En la siguiente figura se muestra el trabajo realizado por el servomotor, resaltando que su capacidad máxima de carga es de 93.31 Kg y un torque correspondiente de 5.49 N\*m.



*Figura 18.* Pruebas de carga y torque de servomotores

Las pruebas realizadas para los servomotores fueron determinantes para verificar que el control fuera adecuado para que el robot de inspección cuente con el avance deseado dentro de la tubería de turbosina. En primer lugar, se hizo una calibración de los controladores en conjunto con los motores como se muestra en la siguiente figura.



*Figura 19.* Ajuste del conjunto controlador y motor

En la siguiente figura se muestra la calibración realizada con el software del controlador ESCON Studio.

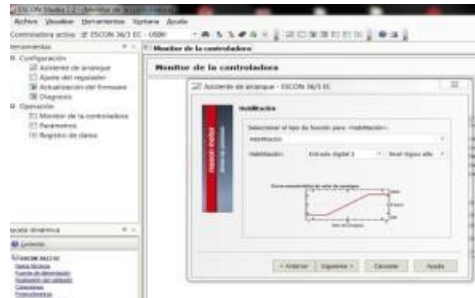


Figura 20. Calibración con el software del controlador

Una vez realizada la calibración se corrieron diferentes pruebas de comprobación del control de los servomotores obteniendo como ya se mencionó resultados satisfactorios a continuación se muestra la gráfica de respuesta del servomotor a una señal cuadrada de referencia.



Figura 21. Respuesta de los servomotores Maxon

Debido al correcto funcionamiento de los motores Maxon bajo las condiciones de trabajo se seleccionaron sin duda.

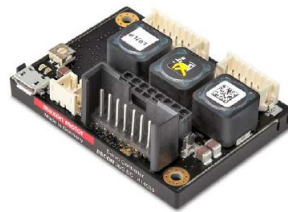


Figura 22. Motor DC y controlador Maxon

## Selección de sensores

Como variables de retroalimentación se definen la posición actual del robot, velocidad y torque de los motores de tracción y por supuesto su inclinación para determinar un cambio de diámetro en la tubería, es por eso que se mencionan los sensores para hacer lectura de estas variables físicas y analizarlas en el procesador de señales digitales (DSP).

**Sensores Hall.** Una de las variables importantes para obtener control de movimiento sobre el robot es la velocidad y el torque. La ventaja del controlador del motor Maxon es la entrega de señales donde vienen concatenados estos datos, debido a que el motor tiene integrado un conjunto de sensores hall que envían la información a estos controladores. Por lo tanto, ya no sera necesario implementar un sensor externo para la recopilación de estos.



*Figura 23.* Controlador Maxon

**Sensores de inclinación.** Para determinar un cambio de inclinación en las tuberías que a la vez esto nos da información de un cambio de diámetro, se tiene el siguiente inclinómetro, fue seleccionado gracias la buena compatibilidad al controlador, ya que tiene una interfaz robusta para que la lectura de datos sea fiable esto gracias al protocolo de comunicación SPI.



*Figura 24.* Sensor inclinómetro aplicado en el posicionamiento del robot

## Selección de electrónica de acondicionamiento

**Búfer.** Para habilitar las entradas del DSP es necesario la implementación de un búfer para establecer una alta impedancia y así evitar sobrecargar a la entrada hablando de corriente. Un transceptor octal fue la elección ya que este puede entregar niveles de voltaje compatibles con el DSP y además que tiene la flexibilidad de cambiar el sentido de entrada a salida.



Figura 25. Transceptor octal 74HC245D

**Optoacoplador para señales digitales.** La transmisión y recepción de señales conlleva a altas frecuencias y corrientes a gran escala, por lo que es necesario un elemento de aislamiento para evitar el contacto directo de la electrónica de potencia con la electrónica digital evitando la inducción de ruido eléctrico al control y la infiltración de señales de alta corriente, al mencionar altas frecuencias da la tarea de encontrar también un optoacoplador capaz de permitir el paso de señales a una velocidad de "switcheo" grande, por lo que se ocupan transiciones rápidas. Una opción fiable fue el optoacoplador a colector abierto, con su adaptabilidad a niveles TTL y su velocidad alta de conmutación se considera una elección óptima a nuestras necesidades.

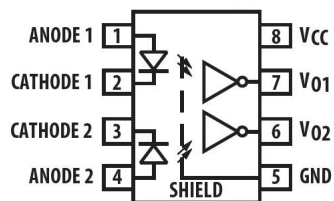


Figura 26. Optoacoplador a colector abierto



## Selección de fuentes de alimentación

Para poder suministrar energía a toda la electrónica previamente seleccionada es necesario tener un rango de voltajes apropiado para su funcionamiento y evitar sobrecargas, la fuente externa que viene del cordón de vida que suministrara energía al robot en general tendra un voltaje nominal de corriente directa en 24 volts, por lo que sera necesario disminuir ese voltaje con convertidores DC a DC. Se opto por un convertidor de 24 volts a 5 volts de corriente directa ya que el máximo voltaje de funcionamiento en toda la electrónica cubre un rango de entre 3.3 a 5 volts.

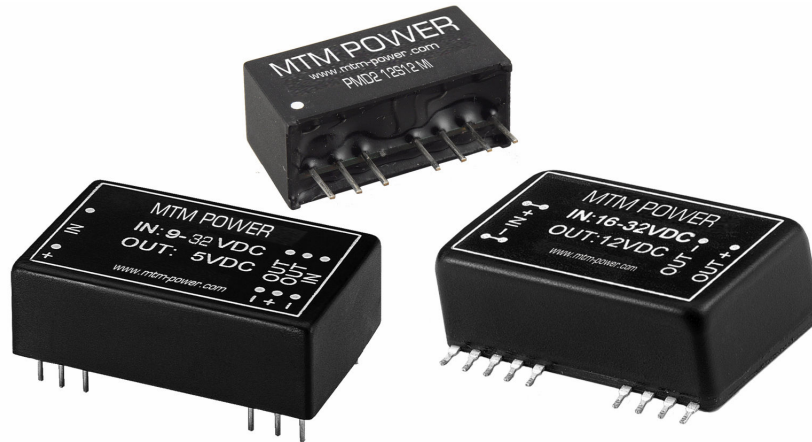


Figura 27. Convertidor DC a DC

Para tener un voltaje constante evitando caídas de tension y evitar la entrada de frecuencias no deseadas el fabricante propone el siguiente filtro:

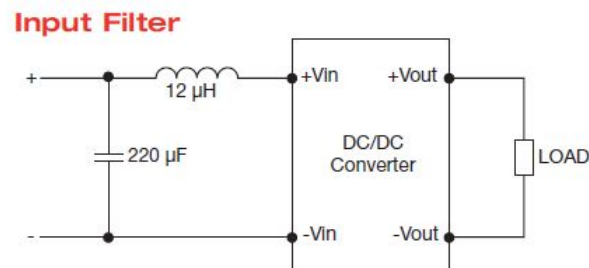


Figura 28. Filtro para convertidor DC a DC

**Diseño de la etapa de electrónica**

En el diagrama mostrado en la fig.29 se observa el ordenador conectado hacia un DSP al cual se le denomina como maestro y este al mismo tiempo está conectado con su DSP (esclavo), comunicado por medio de un bus RS-232 en tiempo real, el cual configura los parámetros del robot dentro de la tubería. A la vez, estos procesadores enviarán señales de tipo modulación de ancho de pulsos también conocida como PWM (por sus siglas en Inglés “Pulse Modulation Width”) hacia una etapa de acondicionamiento y filtro, para evitar que corrientes por parte de las señales de potencia alteren o dañen al procesador. De tal forma que los motores sean accionados de manera controlada con una respectiva retroalimentación para determinar su velocidad y posición de cada uno. Al tener definido el diagrama de bloques se procedió al desarrollo de pruebas para cada etapa del circuito electrónico de control, donde el primer paso a considerar fue poner en marcha controlada el motor de tracción con su respectivo controlador.

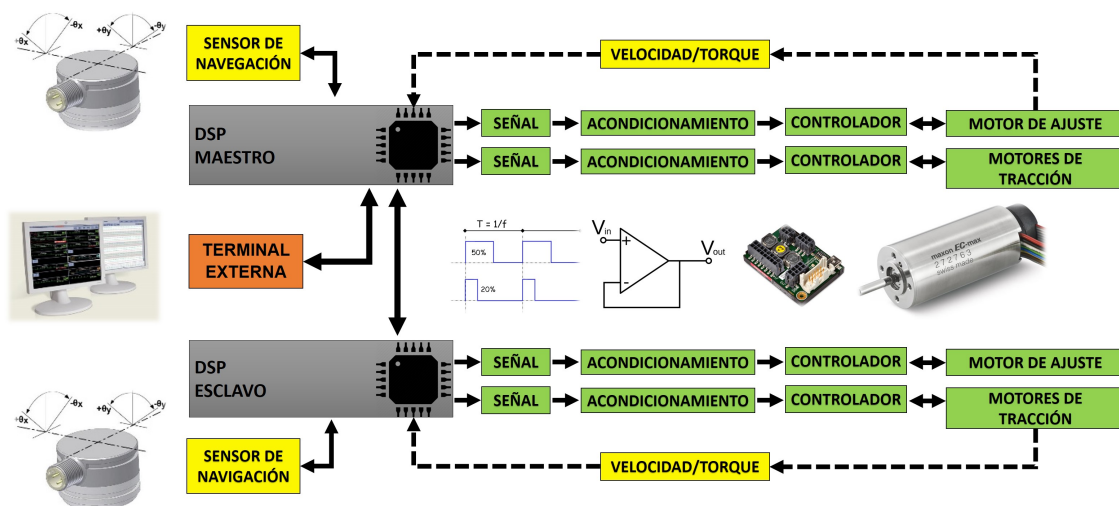
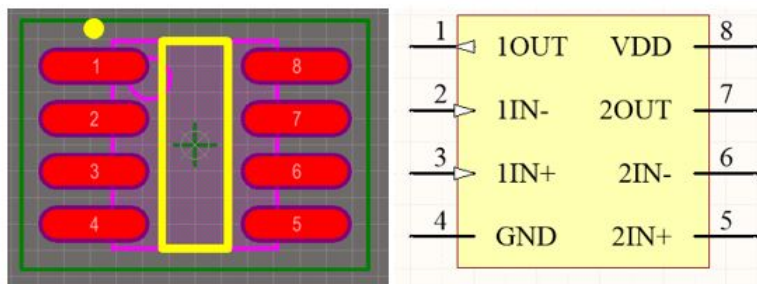


Figura 29. Diagrama a bloques del nuevo diseño conceptual del sistema de tracción interna

## Desarrollo de tarjetas electrónicas PCB

En esta etapa, utilizando una herramienta de diseño en software se realiza el desarrollo de los circuitos impresos. Altium designer®, uno de los programas para diseño electrónico que nos fue útil y que tiene una interfaz amigable al usuario fue el intermediario para cubrir con los estándares de calidad para un buen diseño.

**Diseño de librerías.** Debido a que el software carece de algunas estructuras de componentes electrónicos, se implementaron nuevas librerías dentro del software, como por ejemplo, los circuitos de montaje superficial. El primer paso para realizar este tipo de diseños es hacer el ruteo de pistas en PCB donde el componente será montado mediante soldadura. Posteriormente se diseña el esquema designando cada pin del componente con los del PCB.



*Figura 30.* Diseño de una librería, en la izquierda se visualiza el PCB y en la derecha el esquemático

**Diseño de los esquemáticos.** El proceso de fabricación de las tarjetas electrónicas en PCB, se inició diseñando el circuito en esquemático para tener una manera mas gráfica de visualizar el cableado de todos los componentes electrónicos y posteriormente hacer el ruteo del circuito al ámbito del PCB. Se requiere de el diseño de 4 tarjetas electrónicas las cuales son:

- Tarjeta de control y acondicionamiento digital
- Tarjeta de acondicionamiento analógico
- Tarjeta de fuentes de alimentación
- Tarjeta para conexión de controladores de motor.

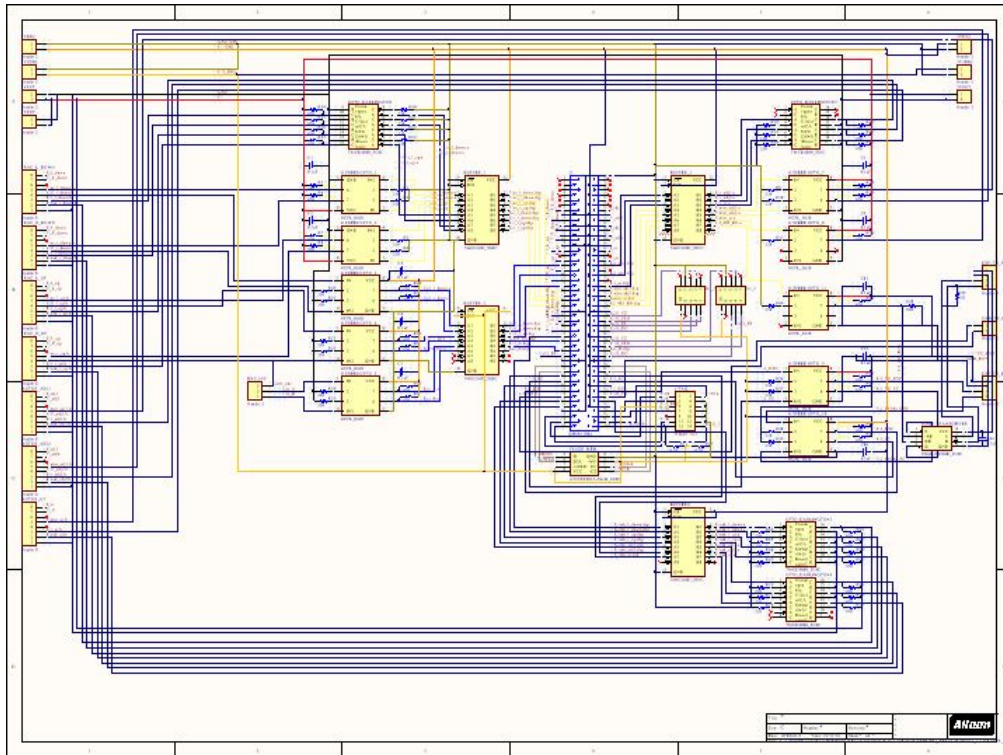
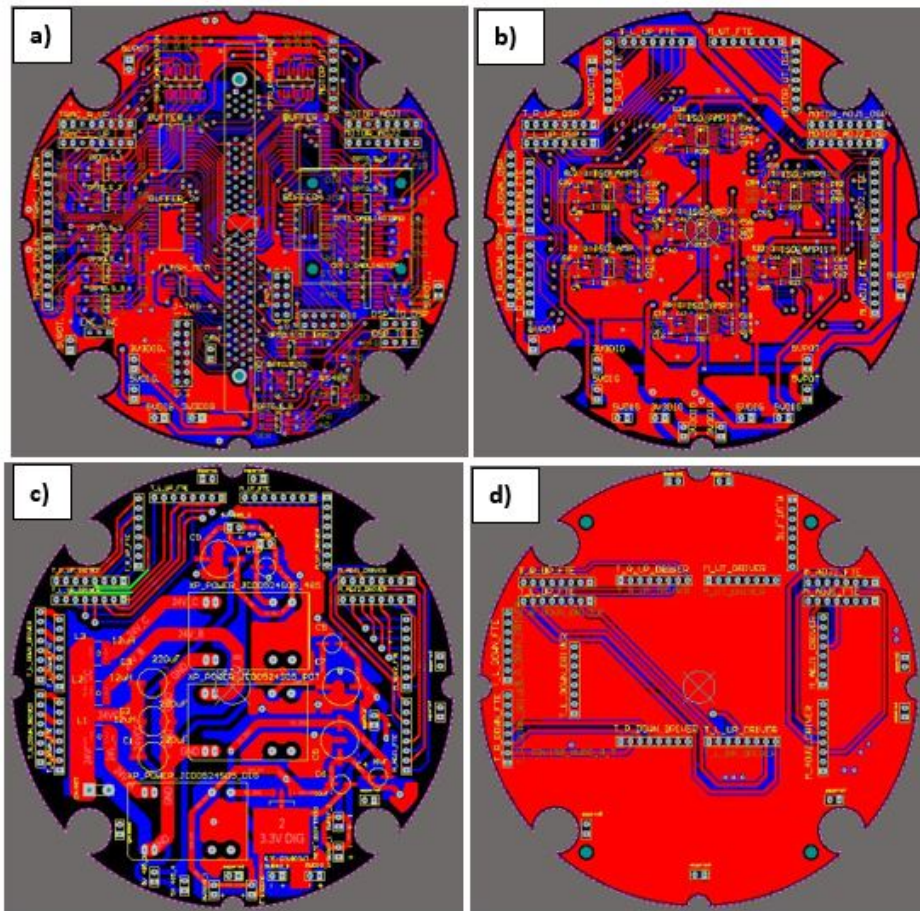


Figura 31. Ambito esquemático de un PCB

**Diseño de ruteo PCB.** Para que el fabricante pueda interpretar un diseño electrónico y maquinarlo es necesario realizar el ruteo PCB de cada tarjeta y exportarlo a un archivo legible para la maquina donde sera manufacturado. A continuación se muestra cada uno de los diseños de ruteo PCB de cada tarjeta electrónica.



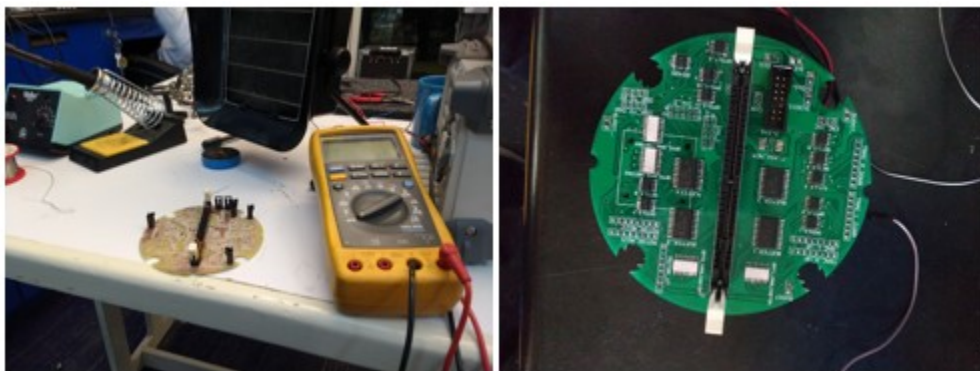
*Figura 32.* (a) control y acondicionamiento digital (b) Acondicionamiento analógico (c) Fuentes de alimentación (d) Conexiones para controladores de motor

## Resultados

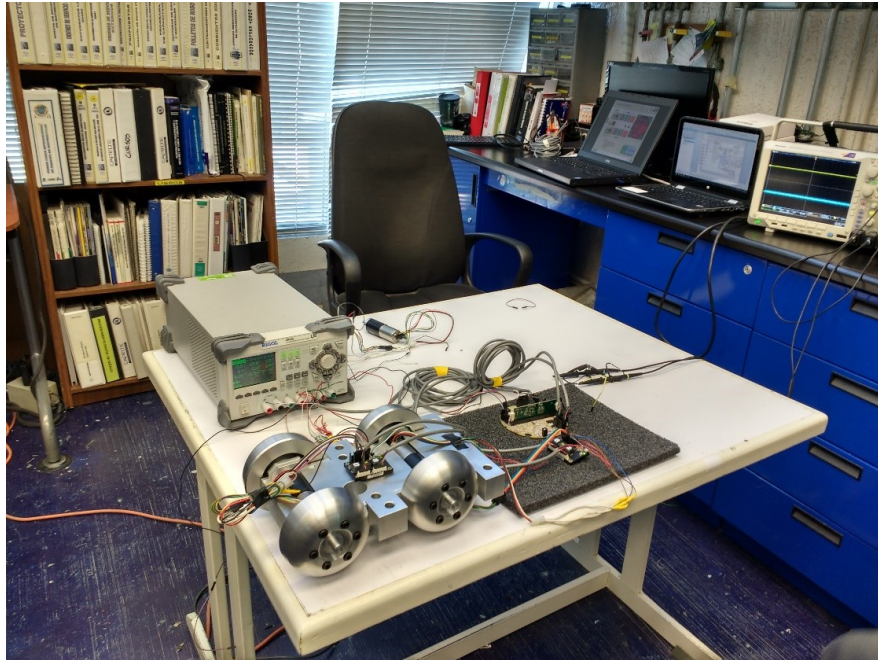
Después de que los circuitos se diseñaron entonces pasaron a ser fabricados y probados al inicio con fuentes de voltaje externas porque aún no se contaba con una tarjeta especialmente para suministrar voltaje a la tarjeta de control y de filtrado analógico. Empezando con la prueba de señales PWM hacia los motores de tracción, posteriormente ya teniendo los componentes para ensamblar cada una de las tarjetas fue que colocaron una sobre otra para hacer la transferencia de señales de tal forma que en conjunto quedará como un pastel o torre en las que eran sostenidas o aseguradas sus conexiones unas con otras por medio de pines tanto de tipo hembra como macho.

### Pruebas y ensamble de los circuitos impresos manufacturados

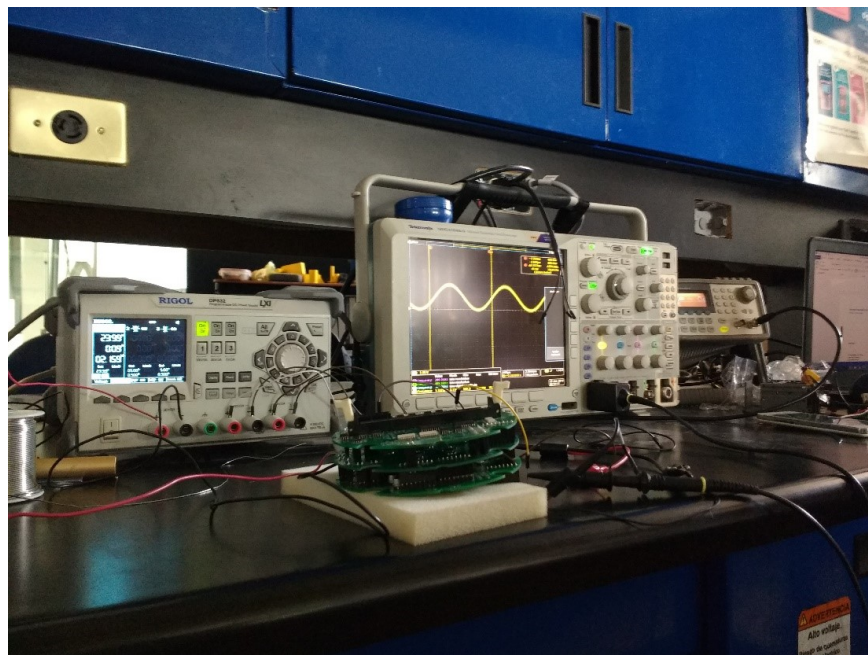
Para cerciorarse de que las señales y las fuentes de voltaje mandaran su nivel correcto de voltaje hacia el microprocesador o hacia los controladores de cada motor optamos por visualizar el comportamiento de cada una de estas con el osciloscopio y un generador de señales, con este propósito asegurarnos de no dañar ninguno de los dispositivos utilizados en todo el circuito.



*Figura 33.* Comparación del ensamble de circuitos integrados en el circuito impreso, prototipo 1: manufacturado en CIDESI, prototipo 2: manufacturado por externos



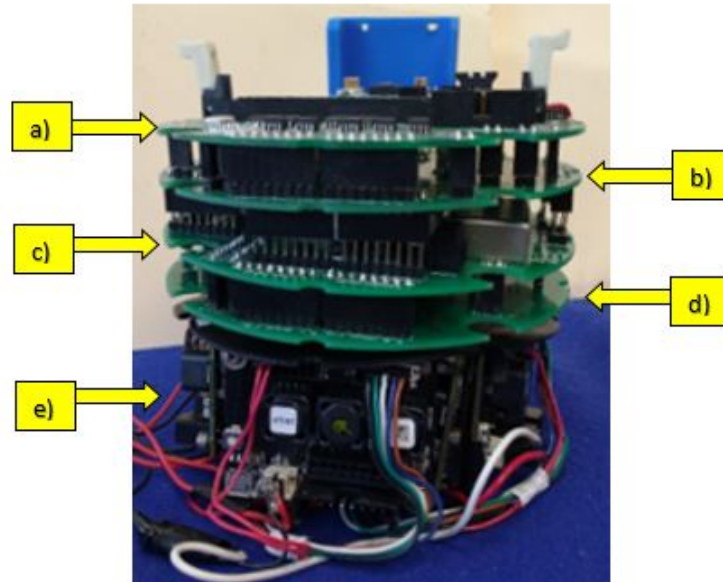
*Figura 34.* Pruebas de control de motores en el Sistema de tracción



*Figura 35.* Pruebas de las señales de filtración analógica con el conjunto de circuitos impresos ensamblados uno sobre otro mediante pines

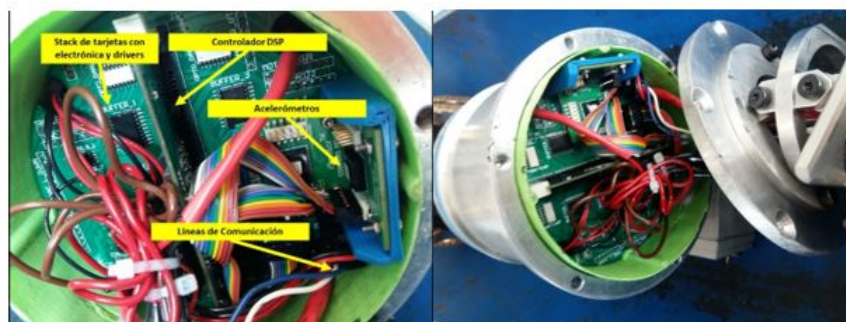
### Ensamble de los circuitos impresos en el robot

Finalmente, en la siguiente figura se muestran todas las tarjetas electrónicas fabricadas e interconectadas entre si, que conforman el sistema de control de tracción interna del robot de inspección.



*Figura 36.* (a) control y acondicionamiento digital (b) Acondicionamiento analógico (c) Fuentes de alimentación (d) Conexiones para controladores de motor (e) controladores de motor

La siguiente figura muestra los componentes más importantes de la tarjeta principal de control, cabe señalar que esta última ya se encuentra ensamblada con las demás tarjetas e insertada dentro de la capsula de protección.



*Figura 37.* Tarjeta de control dentro de capsula de protección



### Pruebas preliminares de sistema de tracción interna de robot de inspección

Las pruebas del sistema de tracción interna consistieron en lo siguiente:

- Pruebas preliminares de tracción interna a medio tubo
- Pruebas preliminares de tracción interna en tubo completo
- Pruebas preliminares de tracción interna en tubo completo observando su inclinación y velocidad de avance.
- Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI
- Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI sumergido en aceite dieléctrico

Las pruebas de tracción interna realizadas en un medio tubo se emplearon para determinar y observar el comportamiento a lo largo del trayecto del robot de inspección, las cuales determinaron varios aspectos para visualizar la velocidad y torque requeridos para el avance del robot de inspección. Una de estas pruebas se muestra en la siguiente figura.



*Figura 38.* Pruebas preliminares de tracción interna a medio tubo

Para las pruebas preliminares en tubo completo del robot de inspección se determino el sentido de giro que debe tener cada una de las ruedas para el avance adecuado en estas condiciones, además, de tener la apertura necesaria para la sujeción y la tracción del tractor a lo largo del tubo, dichas pruebas también arrojaron los valores para determinar la velocidad y torque adecuados para cada una de las llantas y así obtener una variación de la inclinación del tractor deseada. Una de estas pruebas se muestra en la siguiente figura.



*Figura 39.* Pruebas preliminares de tracción interna tubo completo

Ahora bien, establecidos los parámetros de tracción del robot de inspección dentro del tubo completo podemos determinar la inclinación y avance con el cual puedan trabajar los tractores mediante la variación de velocidad de cada una de las llantas, esto nos ayudó para poder establecer los valores de inclinación y avance que puede lograr el tractor. Una de estas pruebas se muestra en la siguiente figura.



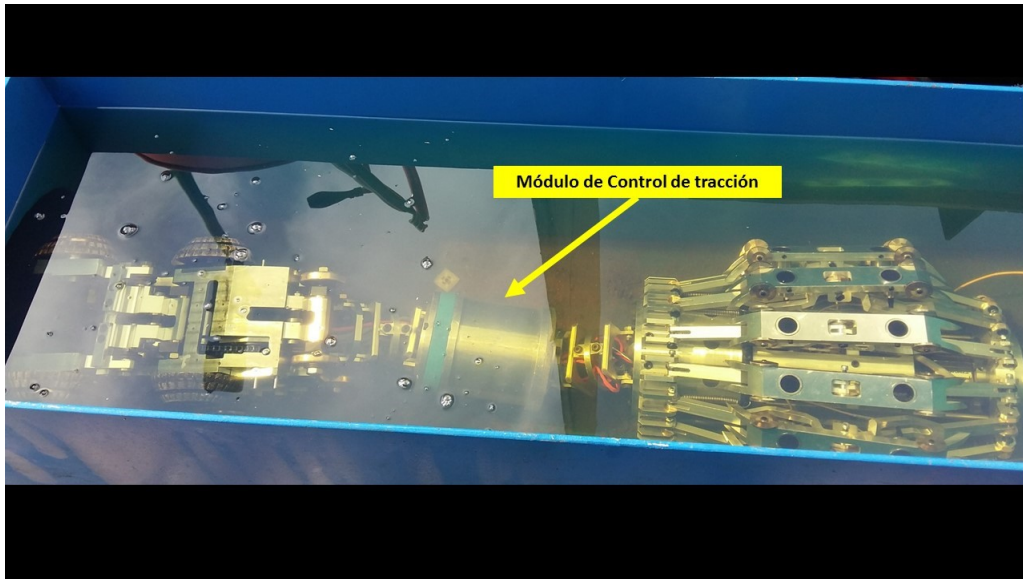
*Figura 40.* Pruebas preliminares de tracción interna tubo completo observando su inclinación y su velocidad de avance

Durante las pruebas en el banco de evaluación en las instalaciones de CIDESI, se pudo observar un comportamiento similar al obtenido durante las pruebas controladas en el tubo de evaluación cerrado, teniendo ligeras variaciones en su desplazamiento, que ocasionaba un ligero aumento de consumo de corriente, esto debido a los cordones de soldadura a lo largo del banco de evaluación. Una de estas pruebas se muestra en la siguiente figura.



*Figura 41.* Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI

Las siguientes pruebas preliminares dentro del banco de evaluación se desarrollaron inundando el banco con aceite dieléctrico, logrando un desplazamiento adecuado dentro del banco y un funcionamiento correcto de las tarjetas de control.



*Figura 42.* Pruebas en el banco de evaluación desarrollado en CIDESI sumergido en aceite di eléctrico

## Conclusiones

Este robot presenta un nuevo mecanismo en el que los motores deben ejecutar el movimiento del sistema, por lo que se desarrollo la electrónica adecuada para tener la posibilidad controlar el comportamiento de los servomotores debido a los cambios que el robot experimenta a través de la tubería. El sistema de tracción funciona de la manera apropiada porque la electrónica se encargó de ejecutar algoritmos de control desde el procesador digital mediante el acondicionamiento de señales que vienen del acople de las retroalimentaciones de los sensores de inclinación y corriente en los motores. En consecuencia al correcto funcionamiento del sistema de tracción se logra la navegación del robot sin interrupciones.

En la siguiente tabla, se muestra una comparación de la versión anterior del robot desarrollada por CIDESI y el nuevo prototipo considerado.

Cuadro 4

*Comparación de los robots de inspección*

| Patente              | Tipo        | Auto-impulsado | A prueba de explosión    | Adaptabilidad | Controlador |
|----------------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------|-------------|
| Diablo instrumentado | Tipo PIG    | No             | Si                       | No            | FPGA        |
| Nuevo prototipo      | Tipo ruedas | Si             | Si, Turbina (En proceso) | Si            | DSP         |

Analizando la tabla 3; el nuevo prototipo comparado con la versión anterior y las otras patentes mencionadas en el estado del arte, cumple con todas las características para ser un sistema autónomo. El resultado de este desarrollo hará la inspección más segura y más eficiente en términos de tiempo y dinero, debido a su multifuncionalidad. También; se menciona el tiempo, porque la electrónica aumentará la velocidad de inspección indirectamente, por los motores en el robot mediante el controlador más rápido y el acondicionamiento

preciso. Las versiones futuras podrían ser mejoradas mediante la unión de una fuente de tensión interna; Lo que significa que este robot necesita actualmente un cable para trabajar en todas las inspecciones programadas, por lo que otros prototipos serán considerados con estas mejoras.

### Bibliografía

Alciatore, D., y Hestand, M. (2003). *Introduction to mechatronics and measurement systems*. McGraw-Hill. Descargado de [https://books.google.com.mx/books?id=n\\_pSAAAAMAAJ](https://books.google.com.mx/books?id=n_pSAAAAMAAJ)

Atul A. Gargade<sup>1</sup>, S. S. O. (2016). Development of in-pipe inspection robot. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*.

Bishop, R. H. (2005). *Mechatronics: an introduction*. CRC Press.

Choi, C., y Jung, S. (2006). Pipe inspection robot with an automatic tracking system using a machine vision. En *Sice-icase, 2006. international joint conference* (pp. 1285–1290).

Dunn, W. (2005). *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. McGraw-Hill Education. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=5kgzTqQDFNoC>

Eia.gov. (2017). *International energy statistics*. Descargado de <https://www.eia.gov/beta/international/data/>

Fujiwara, S., Kanehara, R., Okada, T., y Sanemori, T. (1993). An articulated multi-vehicle robot for inspection and testing of pipeline interiors. En *Intelligent robots and systems'93, iros'93. proceedings of the 1993 ieee/rsj international conference on* (Vol. 1, pp. 509–516).

Fukuda, T., Hosokai, H., y Uemura, M. (1989). Rubber gas actuator driven by hydrogen storage alloy for in-pipe inspection mobile robot with flexible structure. En *Robotics and automation, 1989. proceedings., 1989 ieee international conference on* (pp. 1847–1852).

Ghorbel, F., y Dabney, J. (2007, febrero 27). *Autonomous robotic crawler for in-pipe inspection*. Google Patents. Descargado de <https://www.google.ch/patents/US7182025> (US Patent 7,182,025)

G.R., J. (1985). Sensor technology for the future. *Sci.Instrum*, 18, 719-735.

Hagene, J., Haugholt, K., Tørring, H., y Vartdal, K. (2005, agosto 16). *Pipeline internal inspection device and method*. Google Patents. Descargado de <https://www.google.com/patents/US6931149> (US Patent 6,931,149)

Hayashi, I., y Iwatuki, N. (1998). Micro moving robotics. En *Micromechatronics and human science, 1998. mhs'98. proceedings of the 1998 international symposium on* (pp. 41–50).

Hedgcoxe, P., y Zinsmeyer, C. (1989, septiembre 5). *Robotic pipe crawling device*. Google Patents. Descargado de <https://www.google.ch/patents/US4862808> (US Patent 4,862,808)

Huang, H.-P., Yan, J.-L., y Cheng, T.-H. (2010). Development and fuzzy control of a pipe inspection robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(3), 1088–1095.

Kaushik, D. (2010). *An introduction to microprocessor 8085*. Dhanpat Rai.

Langley, R., Huggins, J., Carter, J., Paulley, D., Roberts, K., Davis, D., ... Lindemann, J. (2014, enero 21). *Internal pipe coating inspection robot*. Google Patents. Descargado de <https://www.google.com/patents/US8633713> (US Patent 8,633,713)

Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. En *Proceedings of the institution of electrical engineers* (Vol. 121, pp. 1585–1588).

Nassiraei, A. A., Kawamura, Y., Ahrary, A., Mikuriya, Y., y Ishii, K. (2007). Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "kantaro". En *Robotics and automation, 2007 IEEE international conference on* (pp. 136–143).

Neubauer, W. (1994). A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes. En *Intelligent robots and systems'94. advanced robotic systems and the real world', iros'94. proceedings of the IEEE/RSJ/GI international conference on* (Vol. 2, pp. 1178–1185).

Okada, T., y Kanade, T. (1987). A three-wheeled self-adjusting vehicle in a pipe, ferret-1. *The International journal of robotics research*, 6(4), 60–75.



- Okamoto, J., Adamowski, J. C., Tsuzuki, M. S., Buiochi, F., y Camerini, C. S. (1999). Autonomous system for oil pipelines inspection. *Mechatronics*, 9(7), 731–743.
- Roh, S.-g., y Choi, H. R. (2005). Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. *IEEE transactions on robotics*, 21(1), 1–17.
- Roman, H. T., Pellegrino, B., y Sigrist, W. (1993). Pipe crawling inspection robots: an overview. *IEEE transactions on energy conversion*, 8(3), 576–583.
- Rubio González C., M. L. J. A. (2010). Mechanic design of ultrasonic equipment for thickness measuring. En *Memorias del xvi congreso internacional anual de la somim*.
- Ryew, S., Baik, S., Ryu, S., Jung, K. M., Roh, S., y Choi, H. R. (2000). In-pipe inspection robot system with active steering mechanism. En *Intelligent robots and systems, 2000.(iros 2000). proceedings. 2000 ieee/rsj international conference on* (Vol. 3, pp. 1652–1657).
- Sandhu, H. (2009). *Making pic microcontroller instruments and controllers*. McGraw-Hill Education. Descargado de <https://books.google.com.mx/books?id=BKSpTe-Pe38C>
- Schempf, H., Mutschler, E., y Goltsberg, V. (2005, julio 12). *Gas main robotic inspection system*. Google Patents. Descargado de <https://www.google.com/patents/US6917176> (US Patent 6,917,176)
- Senturia, S. D. (2004). Microsystem design. En (p. 213-220).
- Subrmaniam, M., y Rai, M. (2013). White paper on explosion proof and intrinsic safety solutions. *Engineering experiences Journal*.
- Wakerly, J. F. (2001). *Diseño digital: principios y prácticas*. Pearson educación.

Anexos

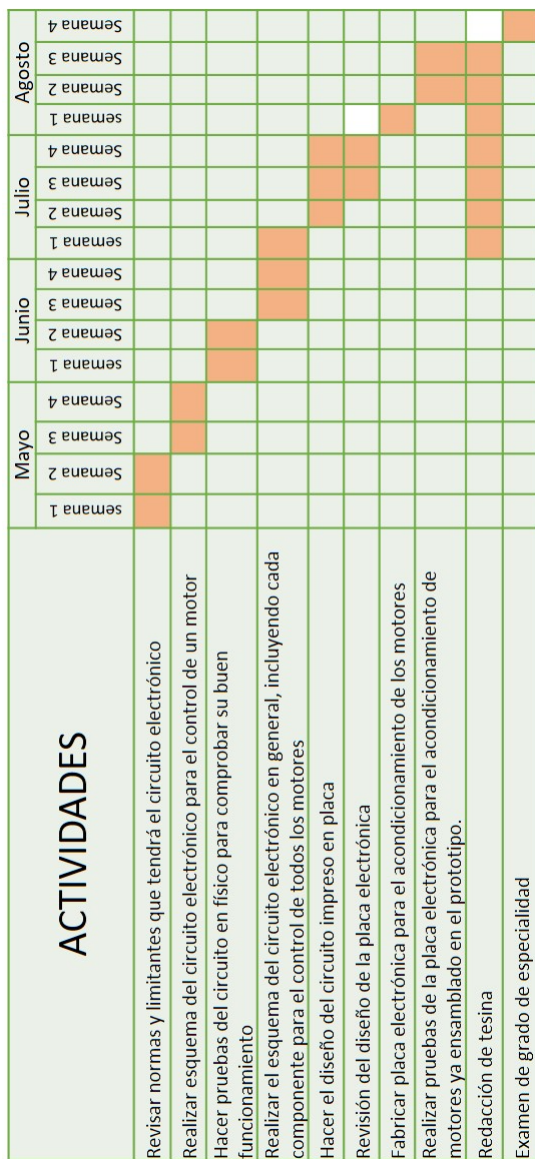


Figura 43. Cronograma de actividades