

# Robot para exploración de tuberías de diseño compacto, modular, estanco y de seguridad intrínseca.

L. M. Di Matteo\*, C. Verrastro\*\*, J. Roitman\*\*\*

\* Grupo de Inteligencia Artificial, Univ. Tecnológica Nacional Fac. Regional Bs. As., Buenos Aires, Argentina.  
Leandro.DiMatteo@ieee.org

\*\* Grupo de Inteligencia Artificial, Univ. Tecnológica Nacional Fac. Regional Bs. As., Buenos Aires, Argentina.  
Centro Atómico Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.  
cverra@cae.cnea.gov.ar

\*\*\* Grupo de Inteligencia Artificial, Univ. Tecnológica Nacional Fac. Regional Bs. As., Buenos Aires, Argentina.  
jroit@sinectis.com.ar

**Abstract**— In this work we propose a teleoperated robot which its main feature is pipelines visual inspection.

Mostly found defects are based on scratches in the pipeline inner face, corrosion, and objects adherence that don't allow the adequate flow of the fluid.

This robot moves longitudinally along the pipeline with a high degree of precision and exactitude in its odometry.

For defects search and detection it is used a mini-video-camera onboard the robot in conjunction with a digitalization card located in a remote computer, where runs the software used for image analysis and for monitoring de robot state.

**Keywords**— Robot, pipeline, pneumatics, artificial vision, visual inspection.

**Resumen**— En este trabajo presentamos un robot teleoperado cuya capacidad principal es la exploración de tuberías para la detección de defectos en el interior de las mismas.

Los defectos encontrados mayoritariamente se basan en rajaduras de la pared interior de la tubería, corrosión, y adherencia de objetos que impiden la correcta circulación del fluido.

Este robot se desplaza longitudinalmente dentro de la tubería con un alto grado de precisión y exactitud en su odometría.

Para la búsqueda y detección de fallas se emplea una mini-cámara de video a bordo del robot con una placa de digitalización en una computadora remota, en la misma se encuentra el software de análisis de

fallas y de monitoreo del estado del robot.

**Palabras clave**— Robot, tubería, neumática, visión artificial, análisis de fallas.

## I. INTRODUCCION

En gran diversidad de sistemas y procesos es necesario la detección de defectos en el interior de tuberías con un alto grado de precisión y exactitud.

La necesidad en la detección de fallas en forma precisa y exacta radica en disminuir el elevado costo que debe afrontarse cuando, para aislar un defecto en una tubería se debe inspeccionar destructivamente un largo tramo de la misma, implicando en el común de los casos ciertos riesgos y obras civiles.

Se pueden citar variadas aplicaciones en las cuales se presenta esta necesidad como por ejemplo: ductos hídricos, conductos de ventilación, tuberías de efluentes, transportes de gases y aceites, industria petrolera, tubos de combustible nuclear, etc.

Los defectos encontrados mayoritariamente se basan en rajaduras de la pared interior de la tubería, corrosión, y adherencia de objetos que impiden la correcta circulación del fluido.

Diseñar un equipo de búsqueda y detección de los problemas mencionados en el párrafo anterior, que satisfaga los requerimientos de aplicaciones en condiciones de trabajo muy dispares presenta grandes desafíos. El equipo debe: soportar la corrosión debida a distintas sustancias líquidas y gaseosas; ser estanco; ofrecer seguridad para ambientes explosivos; poder desplazarse en direcciones horizontales y

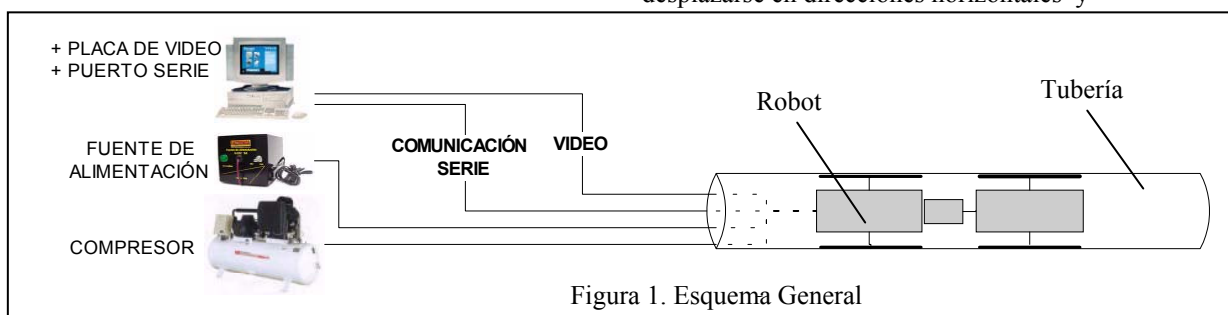


Figura 1. Esquema General

verticales con respecto al suelo; transportar una carga útil; etc.

Actualmente, se emplean técnicas de detección por métodos indirectos y de detección por inspección visual, los cuales trabajan con equipos de videograbación y métodos de desplazamiento horizontales donde la odometría posee un considerable grado de incertidumbre.

Aquí presentamos un robot capaz de desplazarse longitudinalmente por el interior de una tubería en la búsqueda y detección de fallas. Se utilizan 3 cilindros neumáticos para la sujeción al interior de la tubería y la tracción dentro de la misma. Posee una baja incertidumbre en su odometría.

El sistema se compone de (ver “Fig.1”):

a) PC: posee el software que realiza el comando del robot y procesamiento de imágenes mediante técnicas de visión artificial para la búsqueda, análisis y detección

de defectos, además cuenta con una herramienta de gestión y base de datos para efectuar el seguimiento del mantenimiento periódico. A nivel hardware, cuenta con una placa de adquisición de imágenes estándar y un puerto serial para llevar a cabo la comunicación con el robot;

b) Fuente de alimentación: provee la energía eléctrica al robot;

c) Compresor: provee la presión y el caudal de aire adecuados para el funcionamiento de los cilindros neumáticos;

d) Robot para exploración de tuberías: en él se centra este trabajo, posee una mini cámara de video para adquisición de imágenes y un microcontrolador que se encarga de recibir instrucciones desde la PC y ejecutar las diferentes secuencias de desplazamiento, realizando éste el control de odometría.

El robot aquí expuesto, tiene un alto grado de estanqueidad y seguridad intrínseca, con robustez industrial y reducido tamaño para facilitar la

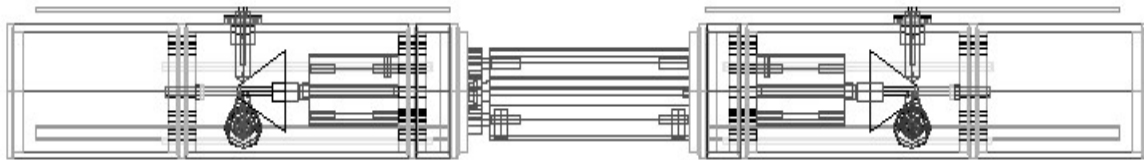


Figura 1-A. Diagramación interna

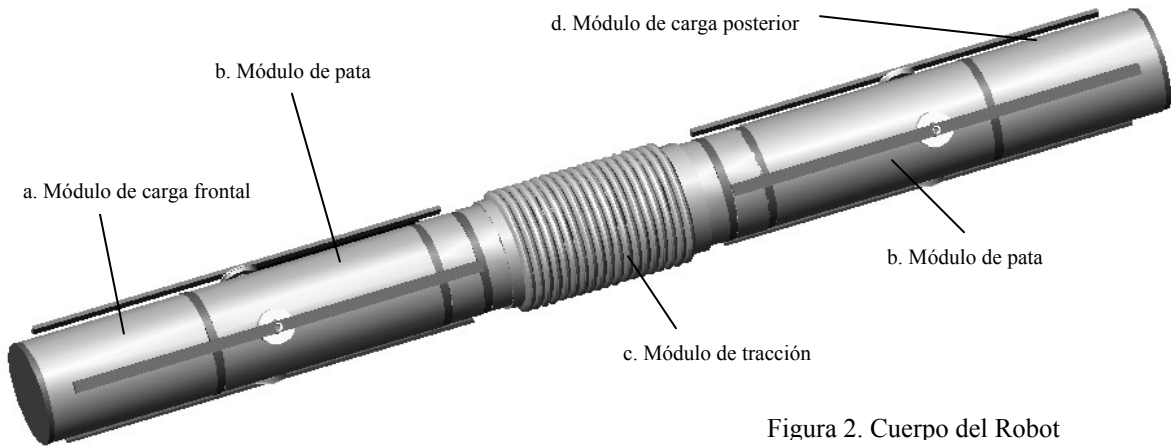


Figura 2. Cuerpo del Robot

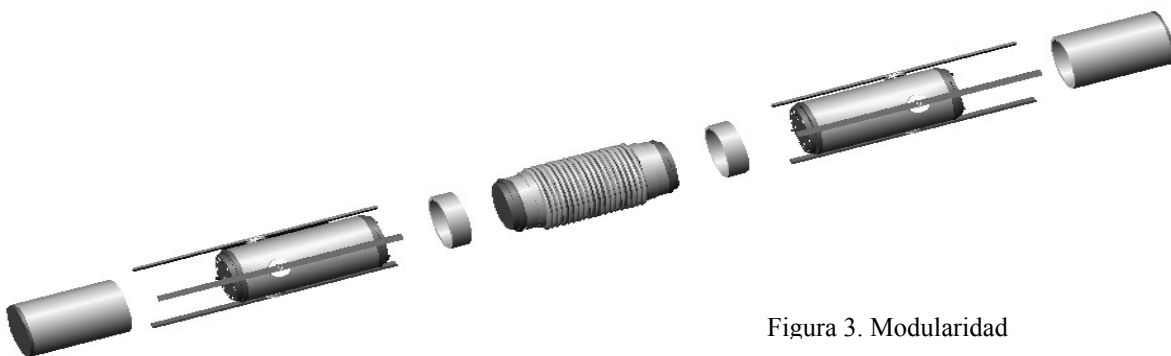


Figura 3. Modularidad

exploración en todo tipo de tuberías. El diseño cumple con normas americanas y europeas.

Para lograr flexibilidad de uso, se diseñó un sistema de patas intercambiables con distintas características y adaptables a diversos diámetros y geometrías.

Cada parte del robot es un módulo independiente que se acopla a través de un disco de sujeción, facilitando el mantenimiento y reparación. Es posible, además, agregar módulos de transporte de carga útil dependiendo de cada necesidad.

## II. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

El robot está compuesto por cinco módulos esenciales, Fig.2:

- a) Módulo de carga frontal: allí se aloja el sistema de visión, contando con una mini-cámara de video y un artefacto para iluminación del interior de la tubería;
- b) Módulos de patas: estas dos unidades poseen un juego de tres patas cada una en una disposición de 120 grados, cada uno de ellos se encarga de presionar el interior de la tubería para sujetarse a ella respectivamente, el accionamiento lo brinda un cilindro neumático (“Automatizar con neumática” Manual de referencia FESTO, 2002);
- c) Módulo de tracción: su núcleo es un cilindro neumático de 100mm de carrera, el cual produce el avance o retroceso longitudinal del robot;
- d) Módulo de carga posterior: aloja las tres electroválvulas empleadas para comandar a los respectivos cilindros neumáticos y a la placa electrónica con microcontrolador.

El concepto de modularidad mencionado en la introducción puede apreciarse en la Fig. 3.

De acuerdo con el diseño, el robot posee un grado de estanqueidad IP67, NEMA 12 Tipo 6 y es apto para ambientes explosivos Clase 1 Zona 0. Todas las dimensiones del mecanizado están concebidas a partir de normas DIN.

Otras características técnicas pueden apreciarse en la tabla 1.

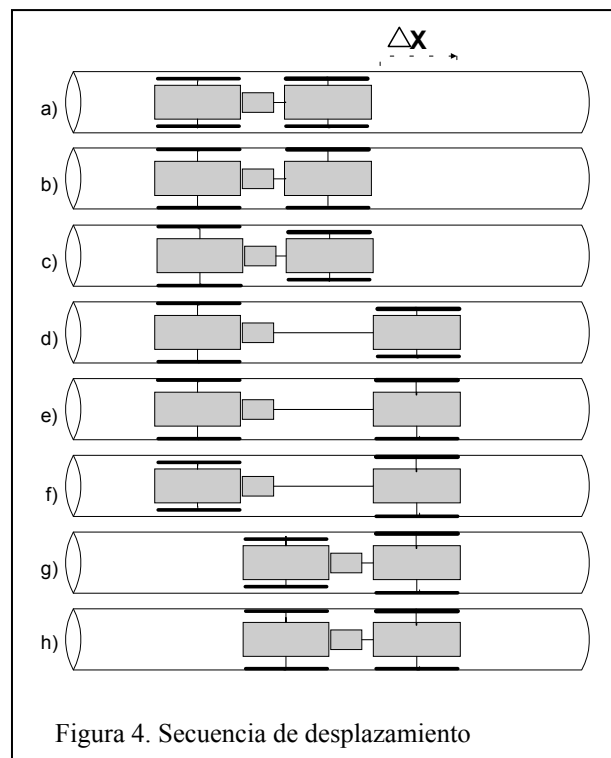
## III. CINEMATICA DEL DESPLAZAMIENTO

El avance y retroceso del robot se produce mediante distintas secuencias de accionamiento de los cilindros neumáticos.

En la Fig. 4, se muestra paso a paso un dibujo esquemático de un ciclo de avance longitudinal del robot. Aquí solo se visualizan los módulos de patas (en los extremos) y el módulo de tracción (en el centro) para facilitar la comprensión.

Cada ciclo de avance involucra 6 movimientos de cilindros neumáticos y se produce un desplazamiento de 10cm. Este ciclo se emplea para realizar el control de odometría a lazo abierto.

<b>Tabla 1. Características</b>	
Presión de aire de trabajo [bar]	6
Tensión de alimentación [V]	12
Velocidad de desplazamiento horizontal máx. [m/min]	5
Velocidad de desplazamiento vertical máx. [m/min.]	3,3
Transporte de carga útil en desplazamiento horizontal [Kg.]	3
Transporte de carga útil en desplazamiento vertical [Kg.]	Fig. 10
Peso del robot [Kg.]	3
Largo efectivo del robot [cm]	83
Diámetro efectivo mínimo del robot [cm]	9,5
Incremento máximo del diámetro al extenderse las patas [cm]	2,8
Precisión de odometría [cm]	+/- 10



## IV. DISEÑO MODULAR

El concepto de modularidad se mencionó en la introducción del presente y los módulos se visualizan en la Fig.2. Ahora se detallarán los aspectos técnicos y funcionales de cada módulo.

### A. Módulo de tracción

Su núcleo es un cilindro neumático (“Automatizar con neumática” Manual de referencia FESTO, 2002) de 100mm de carrera, el cual contrae o expande dinámicamente la longitud del robot, produciendo el avance o retroceso longitudinal. Este cilindro se ilustra en la Fig.5

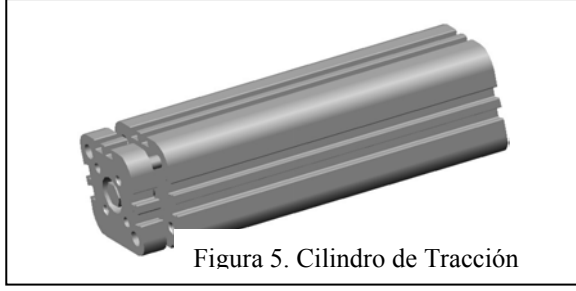


Figura 5. Cilindro de Tracción

Cuando el vástago de dicho cilindro alcanza su máxima elongación, produce una fuerza máxima de 160N, que es controlable a través de un regulador de presión en el circuito neumático, dependiendo de las condiciones de operación. Esta situación se lleva a cabo en 300mseg.

Para el equipamiento electrónico abordo, se debe tomar en cuenta que estará sometido a una aceleración de 0,2G cuando se accione este cilindro.

En traslación horizontal, para evitar torsiones en el vástago del cilindro cuando debe sostener en el aire el 50% del peso del robot, se utilizan varillas-guía de refuerzo.

### B. Módulo de carga posterior

Aloja las tres electroválvulas empleadas para comandar a los respectivos cilindros neumáticos y a la placa electrónica con microcontrolador.

Para mantener el grado de estanqueidad y seguridad intrínseca, los cables y mangueras salen al exterior a través de un prensa-cable con sello de teflón.

### C. Módulo de carga frontal

Aloja el sistema de visión, contando con una mini-cámara de video y un artefacto para iluminación del interior de la tubería.

Para mantener el grado de estanqueidad y seguridad intrínseca y al mismo tiempo tomar imágenes del exterior, la tapa frontal cuenta con una sección transparente, realizada con un acrílico transparente circular con sello de goma, adherido a dicha tapa.

### D. Módulo de patas

Este módulo se encarga de realizar presión o no sobre la pared interior de la tubería con el objeto de afirmarse a la misma. Se ilustra un detalle del módulo en la Fig. 7.

El robot puede desplazarse horizontal o verticalmente, y dependiendo de ello deben tomarse consideraciones en cuanto al coeficiente de rozamiento de las patas y la carga útil transportada para poder llevar a cabo correctamente el control odométrico.

Ahora analizamos la fuerza que ejerce cada pata al presionar el interior de la tubería, Fig. 6:

Siendo  $f_{Cilindro}$  la fuerza proveniente del cilindro neumático, entonces la fuerza entregada por este a cada pata será

$$f_{Cilindro}^* = \frac{f_{Cilindro}}{3} \quad (1)$$

Entonces, la fuerza con la que el cono empuja a cada pata está dada por

$$f_P^* = \frac{1}{2} \cdot f_{Cilindro}^* \cdot \text{sen}(2\alpha) \quad (2)$$

Dado que  $f_{Cilindro} = 270N$ ,  $f_P^* = 38.9N$

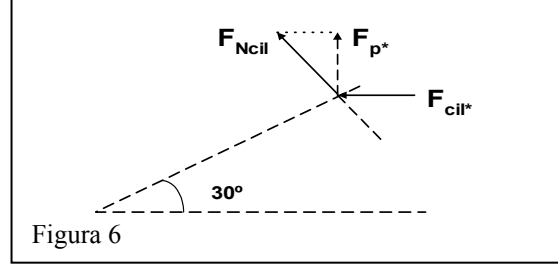


Figura 6

Ahora, para obtener la fuerza ejercida por cada pata contra la pared de la tubería debemos considerar la fuerza producida por el resorte antagónico, Fig. 7, cuya función es la de contraer las patas al retraer el cono.

Puede observarse que  $f_P = f_P^* - f_K$ , (3)

Entonces,  $f_{P \min} = f_P^* - f_{K \max}$  (4)

Siendo  $f_{K \max} = 10N$ ,

Entonces,  $f_{P \min} = 28.9N$

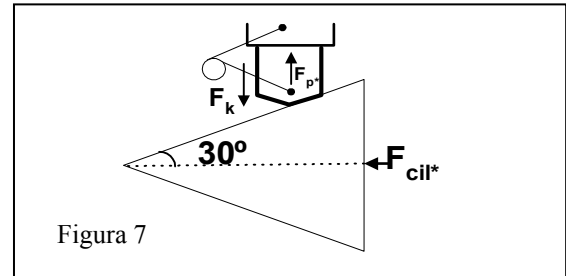


Figura 7

Aquí consideraremos el coeficiente de roce mínimo en desplazamiento horizontal, Fig. 8, para que el robot no resbale al accionarse el cilindro de tracción:

Tomando que  $|f_{Nh}| = |f_{P \min}|$  y siendo  $f_r$  la

fuerza de roce estática  $f_r = \mu \cdot f_{Nh}$  (5)

Considerando que  $f_T = 160N$  es la fuerza máxima ejercida por el cilindro de tracción, entonces la fuerza que debe soportar cada pata debido al efecto de

acción - reacción es  $f_{A-R} = \frac{f_T}{3} = 53.3N$  y para

evitar que la pata se deslice debe cumplirse

$$f_r - f_{A-R} > 0 \quad (6)$$

entonces,  $\mu_{H \min} \cdot f_{P \min} > f_{A-R}$  (7)

obteniéndose así,

$$\mu_{H \min} = 1.8$$

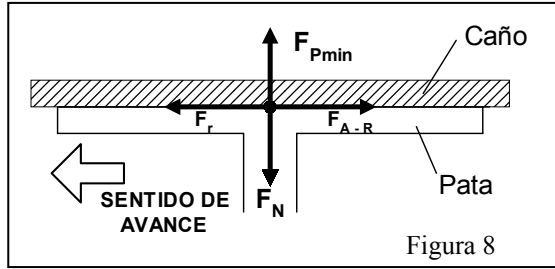


Figura 8

En este caso la carga adicional máxima posible a transportar está dada por el máximo momento de torsión del cilindro de tracción:  $Carga_{H \max} = 3Kg$

A continuación calcularemos el coeficiente de roce mínimo necesario para el desplazamiento vertical del robot, Fig. 9

Tomando que  $|f_{Nv}| = |f_{P \min}|$  y siendo  $f_r$  la fuerza de roce estática  $f_r = \mu_v \cdot f_{Nv}$  (8)

Para evitar que la pata se deslice debe cumplirse

$$f_r - \left( f_{A-R} + \frac{Peso + Carga}{3} \right) > 0 \quad (9)$$

entonces,

$$\mu_{V \min} \cdot f_{P \min} > f_{A-R} + \frac{Peso + Carga}{3} \quad (10)$$

Si el robot se traslada verticalmente sin carga tenemos que  $\mu_{V \min} \cdot f_{P \min} > f_{A-R} + \frac{Peso}{3}$  (11)

Por lo tanto,  $\mu_{V \min} = 2.2$

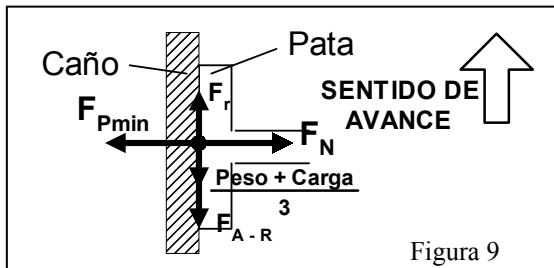


Figura 9

Luego obtenemos una relación funcional entre el coeficiente de rozamiento necesario según la carga adicional útil transportada verticalmente, Fig. 10:

$$\mu_v > \left[ \frac{Carga}{3} + f_{A-R} + \frac{Peso}{3} \right] \cdot \frac{1}{f_{P \min}} \quad (13)$$

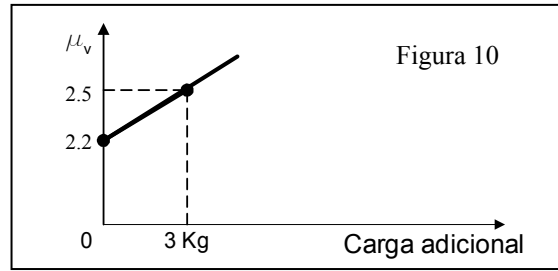


Figura 10

## E. Patas intercambiables

Las patas de apoyo, Fig. 2, ubicadas en el módulo de patas son intercambiables, pudiendo adecuarse a diferentes contornos, Fig. 11, fijándose las mismas a través de un tornillo radial M4.

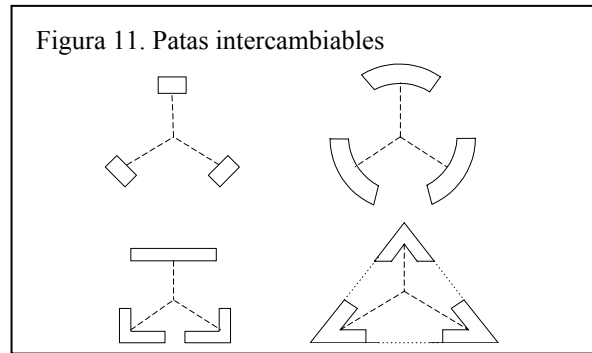


Figura 11. Patas intercambiables

Además de poder adecuarse a diversas geometrías, se puede adaptar a distintos diámetros, solamente cambiando el largo del tornillo radial, logrando un mayor alcance de las patas. Actualmente se están realizando ensayos para determinar el máximo diámetro a abarcar por este método de fijación de patas.

## F. Expansión modular y módulos de carga útil

Esta topología se mostró en la Fig. 3. Cada módulo de carga útil es simplemente un tramo de caño del largo requerido para cada aplicación, cuyo diámetro exterior es de 76,1mm y 4mm de espesor.

El material empleado para este módulo debe, al igual que el resto del cuerpo del robot, cumplir con el grado de anti-corrosión requerido.

Lógicamente, el agregado de un módulo de carga útil implica la colocación de un disco de separación con sus respectivos o-rings y tornillos de fijación.

## V. DISEÑO ESTANCO Y SEGURIDAD Ex

Los discos de sujeción contemplan un alto nivel de sellado para cumplir con el grado de estanqueidad IP 67 y NEMA 12 Tipo 6. Esto se logra mediante el uso de o-rings para cada disco, Fig. 12, y sellos de teflón en los tornillos M2.

Para lograr la seguridad intrínseca mencionada, además de contar con los o-rings y sellos de teflón, el

robot está completamente presurizado y dicha presión se regula con el objeto de alcanzar una mayor presión en el interior del robot que fuera de él. Esto se efectúa aprovechando el aire comprimido liberado por las electroválvulas al desactivar los cilindros neumáticos y la presión es regulada a través de una válvula de alivio.

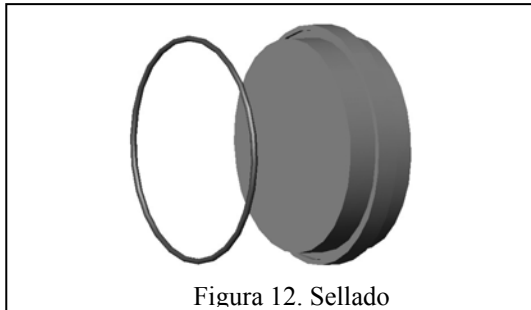


Figura 12. Sellado

## VI. SISTEMA INFORMÁTICO Y ELECTRÓNICO

Aquí se ofrece un breve resumen del sistema informático y electrónico, el mismo brinda una flexible operatividad del robot que permite adecuarlo a diferentes configuraciones.

### A. PC

Posee el software que realiza el comando del robot y procesamiento de imágenes mediante técnicas de visión artificial para la búsqueda, análisis y detección de defectos, además se cuenta con una herramienta de gestión y base de datos para efectuar el seguimiento del mantenimiento periódico. A nivel hardware, se cuenta con una placa de adquisición de imágenes estándar y un puerto serial para llevar a cabo la comunicación con el robot.

### B. Microcontrolador a bordo

Actualmente se utiliza un microcontrolador Intel 8051, éste recibe comandos provenientes de la computadora remota y los ejecuta de manera autónoma.

Algunos de los comandos son, por ejemplo: avanzar xx cm, retroceder yy cm, devolver posición actual, mantener posición de reposo, mantener posición de enclavamiento, etc. Estos comandos están encapsulados en un protocolo de comunicación desarrollado por el grupo GIA de UTN FRBA, y el mismo es similar al estándar industrial Modbus, realizando un handshake del tipo maestro-esclavo.

En base a lo antedicho, el microcontrolador es el encargado del control de odometría y realiza las distintas secuencias de avance y retroceso estipuladas, Fig. 4.

### C. MiniCámara de video para captura de imágenes

Esta minicámara entrega una señal de video color la cual se captura con una placa de adquisición de imágenes estándar.

Actualmente la toma de imágenes se realiza cuadro por cuadro en forma sincronizada con el avance del robot.

Adicionalmente se cuenta con un sistema de iluminación apropiado para mejorar la visión y facilitar a posteriori el procesamiento de la imagen.

## VII. AMPLIACIONES Y APLICACIONES FUTURAS

Posteriormente al ensayo exhaustivo de las virtudes del robot en su configuración actual, se procederá a construir diversos módulos de carga adicionales para cumplir con distintos objetivos. Dentro de estos nuevos módulos se pueden destacar los siguientes: módulo frontal con gripper neumático para extracción de muestras o colocación de sensores in situ; módulo de transporte de sensores de gas, humedad y temperatura; módulo frontal con taladro neumático para efectuar perforaciones; módulo frontal para transporte de elementos de reparación de tuberías.

En una versión posterior de este robot, se construirá otro modelo más compacto y con tres módulos de patas en vez de dos, para permitir un mayor radio de giro y poder operar en tuberías con codos de ángulos más agudos.

## VIII. CONCLUSIONES

Aquí hemos expuesto un robot para exploración y operación en tuberías bajo distintas condiciones físicas extremas. Podemos resaltar que se ha alcanzado el grado de modularidad y flexibilidad deseado, pudiendo adoptar este desarrollo como una plataforma para futuras investigaciones.

## IX. AGRADECIMIENTOS

A los integrantes del grupo GIA de UTN FRBA por sus constantes opiniones constructivas.

A FESTO S.A. (Sr. Lamanna) por su apoyo en la selección de los circuitos neumáticos y donación de materiales para el proyecto.

A la empresa Mangone Hnos. por sus valiosos aportes en el diseño mecánico.

## REFERENCIAS

- Festo S.A., *Manual de Referencia Festo "Automatizar con neumática"* (2002).
- Casillas, A.L., *Máquinas "Cálculos de taller"*, Edición nro. 29 (1976).
- Avallone A. Eugene, *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 10<sup>th</sup> Edition. McGraw-Hill.
- Parmley Robert, *Standard Handbook of Fastening and Joining*. Third Edition. McGraw-Hill.