

# MICRO-ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS

Tamara Canelo, Ernesto Gamba, Alberto Brunete y Miguel Hernando  
Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC, Madrid, España, ernesto.gambao@upm.es

## Resumen

*La inspección robotizada de tuberías de pequeño diámetro es un tema de gran complejidad debido a las restricciones del espacio en el que se deben desarrollar las tareas. Aunque se han desarrollado diversos sistemas robóticos para inspeccionar tuberías, prácticamente no existen robots adecuados para tuberías de reducido diámetro que, por otra parte, son muy abundantes. En esta comunicación se presenta el desarrollo de un módulo de micro-robot destinado a la inspección de tuberías de desagüe domésticas, que en su gran mayoría cuentan con un diámetro de 34 mm, si bien, se ha realizado una configuración con patas que pueden abrirse y cerrarse, de forma que puedan adaptarse a un rango de diámetros entre 32,5 y 55 mm. En concreto se introducirá y desarrollará la arquitectura de un módulo tractor con un novedoso sistema de locomoción, pensado y diseñado para formar parte de una cadena robótica modular heterogénea.*

**Palabras Clave:** Micro-robot, modular, cadena, tubería.

## 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos micro-robots, de menor tamaño para la inspección de tuberías domésticas, es de gran interés para la industria actual, pues, pese a que en el mercado existen múltiples soluciones para la inspección de tuberías, se orientan a las de uso industrial y de alcantarillado, que presentan un mayor tamaño.

Uno de estos robots de inspección de tuberías de alcantarillado es el Makro, desarrollado por el Instituto Fraunhofer de Sistemas Autónomos Inteligentes [1].

Otros de estos robots de inspección son el OmniTread, de la Universidad de Michigan [5], el Explorer del Centro Nacional de Ingeniería Robótica de la Universidad de Carnegie Mellon [10] o el Rodis, desarrollado por la empresa Diakont.

Los modelos presentados anteriormente, se basan en la modularidad para aportar la flexibilidad necesaria en la inspección de tuberías de todo tipo. De ésta forma, un módulo tractor es ensamblado con módulos de inspección [2, 3], ya sea de forma manual por el ser humano [8], de forma automática por el propio robot [6], o mediante una mezcla de ambos [4]. Todos se caracterizan por tener un diámetro muy superior al del sistema presentado en este artículo.

## 2 MARCO DEL PROYECTO Y TRABAJOS PREVIOS

A la vista de lo anteriormente comentado, y de la necesidad de desarrollar robots dedicados a la inspección de tuberías de menor diámetro, se inicia en el Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC una línea de investigación para su concepción y fabricación. Esta investigación comienza con los proyectos “MICROTUBE” y “MICROMULT [7, 9, 11]”, que buscan desarrollar un sistema micro-robótico configurable, modular, heterogéneo e inteligente para inspección de tuberías de alrededor de 26 mm de diámetro, de forma que permita la automatización de este tipo de procesos con un bajo coste.

En el sistema robótico presentado en este artículo el tamaño se ha variado hasta los 34 mm de diámetro, que es el diámetro interno mayoritario en los sistemas de desagüe doméstico, pues su objetivo no es hacerlo tan pequeño como sea posible, sino buscar una aplicación real que en este caso son tuberías de desagüe domésticas.

Otra de las novedades que incluye este proyecto respecto a los anteriores, es el método y material utilizado para su construcción. Se ha pasado del micromecanizado y el uso de estereolitografía, que se realizaba con resina fotopolimérica, a una fabricación con impresoras 3D modernas que usan como material PLA, más duradero y resistente. Con ello se han disminuido mucho tanto los costes de fabricación de los prototipos como los tiempos de desarrollo.

En los proyectos mencionados, se desarrollaron dos tipos de módulo tractor, el helicoidal y el de tipo gusano [7].

El de tipo helicoidal es el que permite mayores velocidades. Dicho módulo, está formado por una parte fija y una móvil que gira sobre su eje y transmite el movimiento a las ruedas, permitiendo su avance por la tubería gracias a la fricción con la misma (Figura 1).

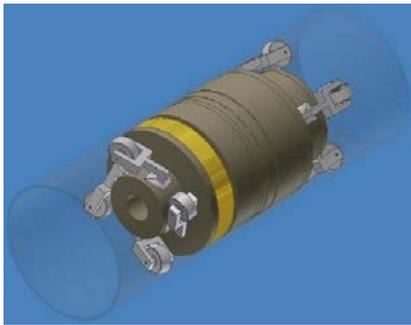


Figura 1. Módulo tractor helicoidal

En cuanto al módulo tractor de tipo gusano (figura 2), está formado por tres sub-módulos que trabajan conjuntamente. Dos de ellos son de agarre y van colocados al principio y al final del conjunto, y el tercero es un extensor que se sitúa entre los dos módulos de agarre mencionados. El movimiento cíclico a partir del cual se obtiene el movimiento es el siguiente:

- El módulo de agarre se expande, haciendo presión sobre la pared del tubo para sujetarse, y el módulo de agarre delantero se comprime para que pueda ser movido por el módulo extensor.
- El módulo extensor se alarga, empujando el módulo de agarre hacia delante.
- El módulo de agarre delantero se expande, quedando sujeto a la tubería, y tras ello se comprime el otro módulo de agarre.
- Finalmente, el módulo extensor se recoge, arrastrando así al módulo de agarre situado en último lugar.



Figura 2. Módulo tractor tipo gusano

Este módulo presenta mayor flexibilidad que el anterior a la hora de adaptarse a la tubería y un menor consumo de energía, sin embargo, es más lento.

El módulo micro-robótico presentado en este artículo, supone una continuación de los dos proyectos mencionados, donde se ha diseñado y desarrollado un módulo tractor de tipo helicoidal, por tener una mayor velocidad de desplazamiento frente al de tipo gusano, pero con un nuevo diseño. El original mecanismo de desplazamiento helicoidal se ha modificado para adaptarse a las condiciones de las tuberías que se desean inspeccionar. Este módulo se unirá con otros módulos desarrollados para formar el sistema micro-robótico.

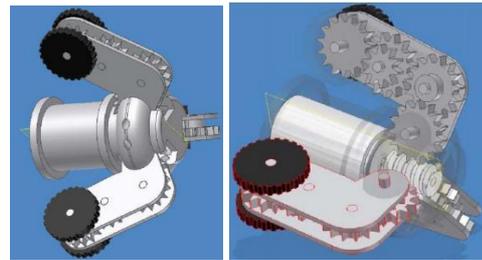


Figura 3. Boceto inicial del sistema tractor

### 3 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

El prototipo se ha diseñado en CAD con el software Autodesk Inventor, excepto aquellos componentes que por sus características, dimensiones o nivel de precisión y detalle que precisan no era viable fabricarlos mediante impresión 3D.

#### 3.1 Diseño Mecánico

La idea del sistema motor fue presentada en [2] y se muestra en la Figura 3. El prototipo no pasó del diseño inicial en CAD, quedando sin construir.

Dicho prototipo ha sido adaptado a las características de la tubería, así como a las limitaciones que presenta la impresora 3D en la que ha sido fabricado. Los componentes que no ha sido posible fabricar, han sido seleccionados entre las opciones que se encuentran disponibles en el mercado y que mejor se adaptan a los requisitos del módulo.

El sistema de locomoción del módulo consiste en un motor de corriente continua (DC), en cuyo eje se acopla un tornillo sin fin, que será el encargado de transmitir el movimiento del motor a las tres patas del robot, al engranar con sendos engranajes presentes en las tres patas. A lo largo de cada pata hay una cadena de engranajes que actúa como etapa reductora y permite adecuar la velocidad de giro del motor a una velocidad lineal adecuada para el desplazamiento del robot en la tubería. Las ruedas están situadas al final de las patas, y giran solidarias al último engranaje. La cadena de engranajes presente en cada una de las tres patas está formada

por tres parejas de engranajes, en las que cada pareja constituye una sola unidad. El engrane se realiza como puede verse en la Figura 4.

Las ruedas pueden girar en ambos sentidos, en función del sentido de giro del motor, por tanto, el robot puede recorrer la tubería en ambos sentido, tanto hacia delante, como hacia atrás.



Figura 4. Tornillo sin fin y engranajes

La extensión de las patas dota al robot de la posibilidad de adaptarse a distintos tamaños de tubería.

### 3.1.1 Modelo CAD

El modelo CAD se realizó buscando la mayor simplicidad y simetría posible, así como garantizar el espesor suficiente de cada una de las partes que se han fabricado por impresión 3D para garantizar la resistencia adecuada, respetando los espacios para los componentes internos y permitiendo el movimiento de todas las partes articuladas. En la Figura 5 se muestra el resultado final del diseño CAD, y otra del diseño CAD con todos los componentes ensamblados.

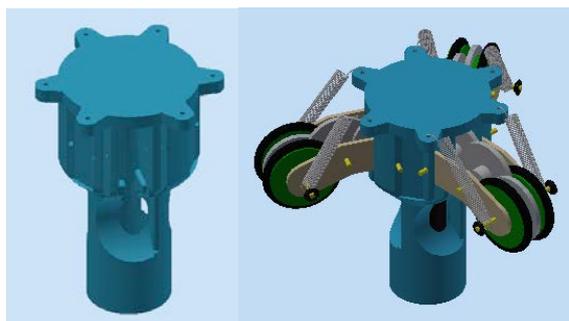


Figura 5. Diseño CAD final

Los componentes internos que constituyen el módulo y sus características se enumeran a continuación.

### 3.1.2 Motor

El componente más importante del módulo es el micro-motor, que tiene que tener potencia y par suficiente para mover el módulo.

Se ha elegido un motor Maxon de corriente continua con escobillas. Presenta unas dimensiones de 6 mm de diámetro y unos 24 mm de longitud. Además, el eje tiene un diámetro de 0.8 mm..

Las principales características que presenta el motor a tensión nominal se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del motor

Tensión nominal	4.5 V
Velocidad en vacío	18600 rpm
Corriente en vacío	14.2 mA
Par nominal	0.318 mNm
Corriente nominal	0.158 A
Par de arranque	0.469 mNm
Corriente de arranque	0.217 A
Rendimiento máximo	56%

### 3.1.3 Tornillo sin fin

Tanto el tornillo sin fin como los engranajes han sido comprados dado que debido a su reducido tamaño no resulta viable fabricarlos ni por impresión 3D ni mediante estereolitografía, ya que por ninguno de estos métodos se obtendrían los acabados y la resistencia que presentan los engranajes disponibles en el mercado. Estos elementos se han seleccionado por sus reducidas dimensiones y porque proporcionan una reducción de velocidad adecuada.

Para conseguir una mayor reducción de velocidad, con engranajes de reducido tamaño estos han de tener un módulo pequeño, además, como es lógico, los elementos que vayan a engranar entre sí deben tener el mismo módulo.

El tornillo sin fin y todos los engranajes seleccionados presentan idéntico módulo. Todos los elementos tienen un módulo de 0.3.

El tornillo sin fin es el encargado de transmitir el movimiento del motor hacia las tres patas y se ha seleccionado uno de la marca Didel que presenta las características mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del tornillo sin fin

Módulo	0.3
Diámetro nominal	2.4 mm
Diámetro máximo	3 mm
Diámetro del eje	0.8 mm
Longitud total	8.4 mm
Longitud de la zona roscada	6.4 mm

### 3.1.4 Engranajes

Se tomó como velocidad adecuada de desplazamiento lineal del módulo unos 2cm/s.

El motor seleccionado proporciona una velocidad angular en vacío y a tensión nominal de 18600 rpm. Teniendo en cuenta este valor, se ha calculado la reducción de velocidad necesaria para alcanzar la velocidad de desplazamiento deseada, supuestas condiciones ideales sin rozamiento ni pérdida de par.

Los cálculos realizados son los siguientes:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{eje}} &= 18600 \text{ rpm} \\ V_{\text{salida}} &= 20 \text{ mm/s} \\ R_{\text{rueda}} &= 6.5 \text{ mm} \\ \omega_{\text{rueda}} &= \frac{V_{\text{salida}}}{R_{\text{rueda}}} = \frac{20 \text{ mm/s}}{6.5 \text{ mm}} = 3.077 \text{ rad} \\ \text{Reducción total} &= \frac{\omega_{\text{eje}}}{\omega_{\text{rueda}}} = 632.65 \end{aligned}$$

La reducción necesaria será por lo tanto de 1: 632.65.

Para conseguir una reducción de velocidad adecuada ocupando un espacio muy reducido, se han seleccionado parejas de engranajes de módulo 0.3 y que presentan las características mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de los engranajes

Número de dientes	12/36
Espesor del engranaje grande	1 mm
Espesor del engranaje pequeño	2 mm
Diámetro nominal $d_n = n^{\circ} \text{dientes} * \text{módulo (mm)}$	3.6 mm/ 10.8 mm
Diámetro externo $d_{m\acute{a}x} = d_n + 0.6 \text{ mm}$	4.2 mm/ 11.4 mm

Colocando en la pata una cadena formada por 3 de estos pares de engranajes que engranen con el tornillo sin fin, la cadena de engrane sería de la siguiente forma,  $36 \times 3 \times 3 = 324$ , con reducción de 1: 324. Teniendo en cuenta la pérdida de par que se produce por fricción en todos los contactos, se comprobó que este montaje ofrecía buenos resultados de velocidad de salida y fuerza suficiente como para permitir al robot desplazarse a lo largo de la tubería e incluso arrastrar alguno módulo más que se desarrolle en el futuro.

### 3.1.5 Muelles

Se han elegido muelles de tracción para garantizar que la apertura de las patas del robot se adapte de forma correcta a la tubería en la que se va a desplazar. La adaptación es puramente mecánica.

El robot cuenta en total con 6 muelles, dos en cada una de las patas, colocados tal y como se muestra en la Figura 6.

La Figura 7 muestra el prototipo final.

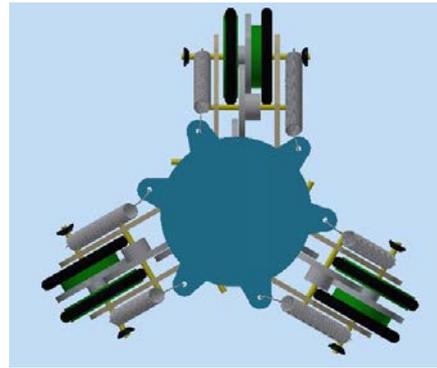


Figura 6. Disposición de los muelles en el módulo



Figura 7. Prototipo final

### 3.1.6 Ruedas

La parte interna de las ruedas se diseñó también en Autodesk Inventor y se fabricó con impresora 3D.

Mientras que para la parte externa se eligió una junta tórica de 13 mm de diámetro externo que actuaba a modo de neumático aumentando la adherencia a la tubería y evitando posibles deslizamientos.

### 3.1.7 Ejes

Se han utilizado ejes de acero de 0.8mm de diámetro y longitud adecuada en cada caso.

### 3.1.8 Patas

Las láminas que forman las patas han sido mecanizadas con una fresadora.

En la Figura 8 se muestra la forma que presenta la pata. La razón por la cual se le ha dado esta forma no es otra que tratar de reducir todo lo posible el tamaño mínimo (plegado al máximo) del robot.

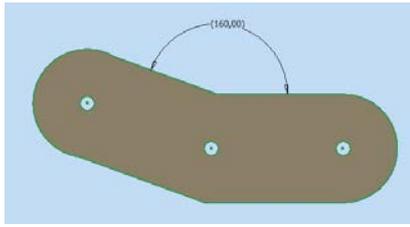


Figura 8. Diseño de las patas

### 3.2 Electrónica

La electrónica empleada inicialmente para las pruebas de validación del prototipo y su sistema es toda externa, quedando pendiente su integración en un nuevo módulo que dote al módulo de mayor autonomía. Para la total autonomía del módulo sería necesario también introducir la batería a bordo del robot.

El control del motor consiste simplemente en alimentarlo en la dirección requerida en cada situación, acelerándolo y frenándolo progresivamente hasta alcanzar la velocidad deseada. Se trata de un control muy sencillo que se puede realizar con cualquier microprocesador.

Se ha seleccionado como plataforma hardware un microcontrolador Arduino Uno por su reducido precio y facilidad de programación.

Al no ser posible conectar el Arduino directamente, ya que la corriente que consume el motor en el arranque, 0.217A, es demasiado elevada para el Arduino, la conexión entre el microcontrolador y el motor requiere una etapa de potencia intermedia que permita el correcto funcionamiento en todas las situaciones.

La etapa de potencia consiste en un driver DRV8833 de la marca Pololu. El controlador de motor DRV8833 puede controlar hasta dos motores de corriente continua a una corriente constante de 1,2A (2A pico). Se trata de un circuito integrado controlador de motor en doble puente H que se puede utilizar para el control bidireccional de dos motores de corriente continua que trabajen a una tensión de 2,7 a 10,8 V. Puede suministrar hasta 1,2A por canal continuamente y puede tolerar corrientes de pico de hasta 2A por canal durante unos segundos, por lo que es un driver ideal para pequeños motores que funcionan con tensiones relativamente bajas.

### 3.3 Interfaz de Usuario

Para poder controlar el movimiento del motor en tiempo real se ha desarrollado una interfaz de usuario en *Processing*. Esta interfaz interactúa con el código

Arduino y permite el control el tiempo real del movimiento del robot dentro de la tubería, controlando el arranque, la parada y el sentido de desplazamiento.

## 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

Visto el diseño y construcción del módulo tractor, así como de la interfaz de usuario desarrollada, se pasa a presentar a continuación los ensayos realizados y los resultados obtenidos en los mismos. En estos ensayos, se evalúa la capacidad de desplazamiento de dicho módulo a lo largo de tuberías de distintos tamaños, materiales y posiciones, con el fin de buscar las condiciones límite de funcionamiento. El módulo también es capaz de abordar giros, si bien, su inclusión en un sistema robótico con más módulos puede aumentar esta capacidad.

La presentación de resultados se ha dividido en tres apartados, mostrando en primer lugar la velocidad del módulo en función del ángulo de inclinación para una tubería recta de 36 mm de diámetro interior. Posteriormente, se realiza la comparación de velocidad en tuberías de distintos diámetros, para finalizar con un ensayo en giros.

### 3.1 Velocidad en Tubería en Función del Ángulo

Para realizar el ensayo de velocidad, se selecciona una tubería recta de 36 mm de diámetro interior y 30 cm de longitud, siendo posicionada con ángulos de 0°, 45° y 90°. Para cada posición, se realizarán 10 medidas del tiempo que tarda el módulo tractor, sin elementos adicionales, en recorrer la tubería completa, para posteriormente realizar la media de todas las mediciones.

Las evaluaciones son realizadas tanto en sentido ascendente como descendente. En la Tabla 4 se recogen los resultados.

Tabla 4. Ensayo de velocidad con inclinación

Velocidad media (mm/s) en tubería de 36 mm		
Inclinación	Ascendente	Descendente
90°	23.9	27.02
45°	24.59	27.13
0°	25.95	

Como cabía esperar, la velocidad es mayor cuando desciende y menor cuando asciende, mientras que en desplazamientos horizontales se tiene una velocidad intermedia. Estas diferencias de velocidades son poco significativas gracias al buen agarre que se ha conseguido proporcionar al robot.

### 3.2 Velocidad en Tuberías de Diferente Diámetro

En cuanto a la velocidad del módulo en tuberías de distinto diámetro, se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Ensayo de velocidad en varios diámetros

Tubería de 34 mm	15.35 mm/s
Tubería de 36 mm	25.95 mm/s

La diferencia de velocidad es notable, de un 40%, pese a que la diferencia de tamaño es muy pequeña. Esto se debe a que la tubería de 34 mm está casi en el límite, que es 32.5 mm y el rozamiento es mayor. Aun así esta velocidad es adecuada.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño y prototipo de un módulo tractor capaz de desplazarse por el interior de tuberías con un rango de diámetros, de 32.5 a 40 mm, cubriendo las dimensiones más habituales en las utilizadas en desagüe doméstico (entre 34 y 36 mm). Para evaluar su funcionamiento, se han realizado los ensayos mostrados anteriormente, y se ha comprobado que su funcionamiento es bueno, sin presentar problemas con la inclinación ni en subidas ni bajadas a lo largo del tubo.

En cuanto a la velocidad y capacidad de arrastre de módulo, se ha observado que es adecuado, siendo éstos parámetros cercanos a los ideales, calculados al inicio del proceso de diseño.

Por lo tanto, el proyecto desarrollado y presentado en esta comunicación ha proporcionado un nuevo modelo de módulo tractor plenamente funcional y capaz de cumplir con los requisitos fijados. Como trabajo futuro, se plantea la posibilidad de realizar una integración de toda la electrónica en el módulo, con un diseño compacto y cumpliendo los requisitos de funcionamiento fijados, así como desarrollar módulos con diferentes funcionalidades y un mecanismo de conexión que permita realizar la inspección de tuberías de forma rápida y precisa, facilitando las reparaciones y desatascos en tuberías de desagüe domésticas que tienden a obstruirse frecuentemente.

### Referencias

[1] Birkenhofer, C., (2004) "A new modular concept for a multi-joint, autonomous inspection robot", *Proc. of 2004 IAS 8, The 8<sup>th</sup> Conference on Intelligent Autonomous Systems*, Amsterdam.

- [2] Butler, Z.; Rus, D., (2003) "Distributed planning and control for modular robots with unit-compressible modules", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, pp. 699-715.
- [3] Duff, D.; Yim, M.; Roufas, K., (2001) "Evolution of PolyBot: A modular reconfigurable robot", *Proc. of COE/Super-Mechano-Systems workshop*, Tokyo.
- [4] Fukuda, T.; Nakagawa, S., (1988) "Dinamically reconfigurable robotic system", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1581-1586.
- [5] Grzegorz, G.; Hansen, M.; Borenstein, J., (2005) "The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance", *Proc. of 2005 International Journal on Industrial Robots, Special Issue on Mobile Robots*, pp 139-148.
- [6] Kotay, K.; Rus, D.; Vona, M.; McGray., (1998) "The self-reconfiguring robotic module", *Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 424-431.
- [7] Brunete A., Hernando M., Torres J.E. and Gambao E., (2012) "Heterogeneous multi-configurable chained microrobot for the exploration of small cavities ". *Automation in Construction* 21 184-198. Elsevier.
- [8] Paredis, C.; Brown, H.; Khosla, P., (1997) "A rapidly deployable manipulator system", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 21, pp. 289-304.
- [9] Brunete A., Hernando M., and Gambao E., (2013) "Offline GA-Based Optimization for Heterogeneous Modular Multiconfigurable Chained Microrobots". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, VOL. 18, NO. 2 578-585.
- [10] Vradis, G.; Schempf, H., (2003) "Design, construction and field demonstration of explorer: A long-range untethered gas-line inspection robot system", *Proc. of October 2003 Semi-Annual Report*.
- [11] Brunete A., Torre J.E., Hernando M., and Gambao E., (2008) "A Proposal for a Multi-Drive Heterogeneous Modular Pipe-Inspection Micro-Robot". *International Journal of Information Acquisition*. World Scientific Publishing Company.