

## Design and application oilfield pipelines inspection prototype robot (progressive cavity pumps and electric submersible pumps)

María Alejandra Urdaneta<sup>1</sup>, Cecilia García<sup>2</sup>, Roque Saltaren<sup>2</sup>,  
Gustavo Contreras<sup>3</sup>, Gonzalo Ejarque<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. urdanetatoo@gmail.com.

<sup>2</sup>Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC. c/José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006. Madrid, España.

<sup>3</sup>Ingeniero de Proyectos, Técnicas reunidas, Madrid, España. gacu88@gmail.com

### Abstract

This paper presents the development of a robot based on tensegrity structure with to perform inspection and maintenance in petroleum pipelines. Due to the nature of application, the robot must be able to move vertically on the outside of the pipe. This type of mechanical structure is characterized by low weight and high capacity to adapt to different diameters. The application requires that the device developed high-speed moving through the pipes used in oil extraction. Note that in these facilities has Submersible Electric Pumps and Progressive Cavity Pumps (PCP), both very sensitive to the environmental conditions, the robot will incorporate sensors to measure variables that may interfere with normal functioning pumps. This article describes in detail the design assumptions made and methodology used to develop the first prototype. Finally, we present the results obtained through the development which has been validated the potential of application.

**Keywords:** robot, vertical pipeline, electric pumps, progressing cavity pump.

## Diseño e implementación de robot prototipo para la inspección de tuberías en pozos petroleros (bombas de cavidad progresiva y bombas electro sumergibles)

### Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un robot basado en la estructura tensegrity con el fin de realizar tareas de inspección y mantenimiento en tuberías petroleras. Debido a la naturaleza de la aplicación, el robot debe ser capaz de desplazarse verticalmente por el exterior de la tubería. Este tipo de estructura mecánica se caracteriza por su bajo peso y su alta capacidad de adaptación a los diferentes diámetros. La aplicación requiere que el dispositivo desarrollado se desplace a alta velocidad por las tuberías utilizadas en la extracción del petróleo. Cabe destacar que en dichas instalaciones se cuenta con Bombas Electro Sumergibles (BES) y Bombas de Cavidad Progresiva (BCP), ambas muy sensibles a las condiciones adversas del entorno. Consecuentemente se prevé que el robot incorpore una red de sensores específicos para medir aquellas variables que puedan interferir en el funcionamiento normal de las bombas. En este artículo se describen detalladamente las hipótesis de diseño realizadas y la metodología utilizada para el desarrollo del primer prototipo. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de dicho desarrollo a través de los cuales se ha podido validar la potencialidad de la aplicación.

**Palabras clave:** robot, tubería vertical, bombas electro sumergible, bomba de cavidad progresiva.

## 1. Introducción

En la gran mayoría de las investigaciones en las que se han desarrollado robots para la inspección de tuberías se pueden clasificar en dos grandes grupos: de acuerdo al lugar donde se utilizan, dentro o fuera de la tubería.

Cuando los robots se utilizan dentro de la tubería pueden ser con dos formas de operación; aquellos que se mueven en el fluido de la tubería pudiendo destacar los tipo "PIG" (Pipeline Inspection Gauges) [1], muy utilizados en la industria petrolera en oleoductos; y aquellos que requieren drenar el líquido que contiene la tubería o que esta no lleve líquidos presentándose también en la bibliografía varios y variados desarrollos en este sentido. Para el prototipo se trabajará con un robot que va por el exterior de tuberías específicamente aquellos en los cuales su desplazamiento más significativo se hace en superficies verticales. En varias investigaciones se reportan algunos de los medios de desplazamientos en superficies verticales, pudiendo destacar las siguientes formas de desplazamientos: por mecanismos magnéticos utilizados para aplicaciones con superficies ferrosas [2], tecnologías en las cuales se utilizan mecanismos de succión para que el robot se pueda sujetar a la superficie de desplazamiento, tecnologías de pinzas o armados las cuales, por sujeción, se fijan a las superficies donde realizan su desplazamiento, robot con patas que pueden utilizar algunas de las formas de sujeción mencionadas anteriormente o adhesivos para realizar sus maniobras y finalmente el desplazamiento con ruedas [3] como se muestra en nuestro prototipo. Antes de continuar con el diseño se definen algunos conceptos:

La Tensegridad término arquitectónico acuñado por Buckminster Fuller [4, 5] como contracción de *tensional integrity* (integridad tensional). Estructuras, cuya estabilidad depende del equilibrio entre fuerzas de **tracción** y **compresión** [6]. En la literatura se reportan varias clasificaciones para esta estructura entre las cuales se puede mencionar sistemas de comprensión flotante "puros" y "no puros" o "clase 1" y "clase 2" [7] dependiendo de si hay o no contacto entre las barras. Con este tipo de estructuras actualmente se han realizado robots para diferentes

aplicaciones de robot móviles [8, 9], control de manipulador hiper-redundante [10]. En la Figura 1 se muestra una estructura hiperboloide similar a la estructura tensegrity propuesta.

La estructura hiperboloide presentada en la Figura 1 posee un sistema de fuerzas y una estructura reglada con doble curvatura que le permite una elevada rigidez y una elevada transmisión mecánica. La estructura gaussiana posee un efecto de fuerzas negativo hacia dentro y no hacia fuera de la estructura que nos permite que la estructura diseñada se abra fuertemente a la tubería. A continuación se presenta el primer prototipo basado en conceptos de tensegrity en la que se han introducidos modificaciones de consideración para poder adaptarla a la aplicación. La Figura 2 muestra vista en CAD del primer prototipo. El diseño contempla una estructura tipo tijera [11, 12].

En los pozos petroleros se pueden encontrar dos tipos de bombas (Figura 3). Las bombas electro sumergibles y las de cavidad progresiva (de ahora en adelante BES y BCP, respectivamente).

Las BES son, quizás, las más utilizadas debido a la capacidad de volumen de fluido que maneja, la alta fiabilidad de sus componentes. Facilitan la independencia de la producción ya que cada pozo posee su propio equipo. Las BCP están compuestas por un eje de forma helicoidal que gira dentro de un estator de goma con cavidades que empujan el crudo a medida que el eje gira a través de ellas (Figura 3a). Profundidades de 8.000 pies, manejando flujos cercanos a los 4.000 barriles por día, dependiendo de su configuración, diámetro, y velocidad de giro. Las BES trabajan a profundidades de 12.000 pies con producción que puede alcanzar los 12.000 barriles diarios dependiendo del pozo (Figura 3b).

Esta tendencia de introducir dispositivos robóticos en el pozo se debe a las grandes pérdidas económicas que se producen cuando el pozo debe clausurarse por causas que podrían fácilmente evitarse con la presencia de un dispositivo inteligente en el pozo que permita medir variables para impedir el daño prematuro de la bomba o para la recuperación de objetos que se puedan caer al pozo durante la instalación y mantenimiento del mismo. Se prevé que el robot cuente

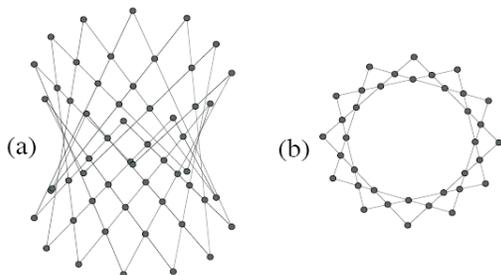


Figura 1 a) Estructura hiperboloide.  
b) Estructura flexionada.

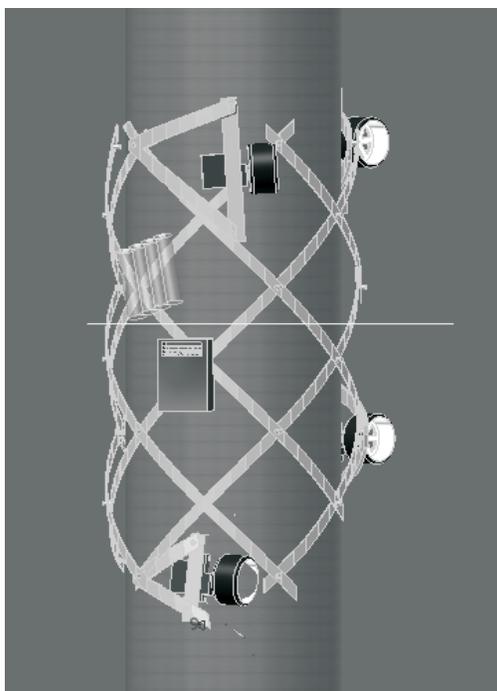


Figura 2. Vista CAD del Robot en la Tuberías.

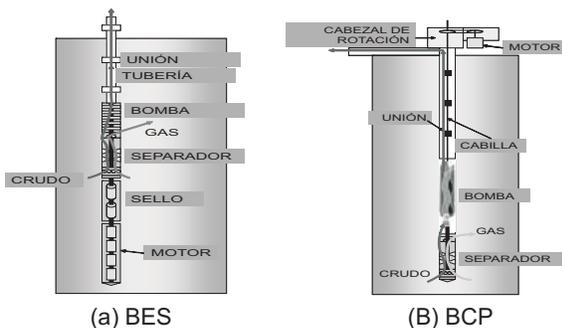


Figura 3. Bombas utilizadas en las estaciones extractoras de petróleo.

con una red de sensores para medir algunas variables de interés que permitan minimizar y corregir el deterioro que sufre la bomba por condiciones de funcionamiento adversas al equipo [13].

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se presentan las consideraciones de diseño y la metodología utilizada para la elaboración del prototipo. En la sección 3 se presenta el análisis de la estructura del robot. En la sección 4 la implementación, en la sección 5 los resultados y finalmente en la sección 6 las conclusiones y recomendaciones de futuros trabajos.

## 2. Consideraciones y metodología utilizada para el diseño

Los criterios de diseño mecánico que hay que tener en cuenta a la hora de robotizar este tipo de tareas deben considerar requisitos funcionales y no funcionales impuestos por las condiciones del pozo. Para el diseño de la estructura se tomaron en cuenta las condiciones que tendría dicha estructura dentro del pozo petrolero que debería desplazarse entre una tubería de acero (tubing) y las paredes del pozo (casing) presentando un anular que es la distancia entre el tubing y el casing a ser considerada para el diseño [14]. En la Tabla 1 se muestra las distancias entre tubing y casing para algunos pozos tipos.

Se observa que la dimensión máxima que puede tener el robot para que pueda desplazarse entre el tubing y el casing es de 50 mm de espesor, para nuestro diseño se utilizó la rueda de 35mm. Adicionalmente esta tubería no presenta codos, solo deberá ser capaz de evitar situaciones en las que la tubería choque con las paredes del pozo para lo cual, la estructura propuesta solo cubrirá dos tercios del diámetro del ducto para poder salvar esa situación o las uniones de la tubería. En la Tabla 2 se resumen las consideraciones de diseño más relevantes tenidas en cuenta.

Como ya se ha mencionado, debe acoplarse fuertemente a la tubería por el exterior; ya que de no ser así podría caer al crudo y provocar el cierre del pozo. Este diseño es rígido y al mismo tiempo liviano, las ruedas deben situarse a 120° una de otra (Figura 4).

Tabla 1  
Diámetros de Anulares entre Tubing y Casing  
(Información de campo suministrada por la empresa BCP – VEN)

Tubing	Casing	Anular
2-7/8" (73 mm)	5-1/2" ( 139.7 mm)	66.7 mm
3-1/2 " (88.9 mm)	5-1/2" (1s 39.5mm)	50.8mm
3 1/2 " (88.9 mm)	7" (177.8 mm)	88.9 mm
4-1/2 " (114.3mm)	9-5/8" (244.4 mm)	130.1 mm
5-1/2 " (139.3mm)	9-5/8" (244.4 mm)	105.1 mm

Tabla 2  
Criterios de diseño

Variable	Consideraciones de diseño
Sistema de Tracción	Con ruedas con desplazamiento Vertical
Temperatura	Material receptáculo con aislamiento térmico, para temperatura ( 400°F) y a prueba de explosión
Dimensiones	50 mm adherido a la tubería
Velocidad	Capaz de desplazarse entre 8000 y 12000 pies (velocidad adecuada).

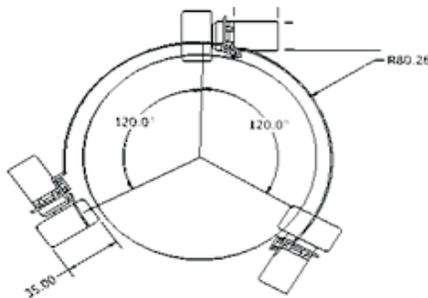


Figura 4. Estructura Robótica con sus ruedas colocadas cada 120 grados.

### 3. Analisis de la estructura del robot

#### Cálculo de la inercia

A un cilindro de masa  $m$ , radio  $R_{rue}$  longitud  $L$  respecto de su eje y la inercia del vehículo reducida al eje de las ruedas. Asimilando cada rueda a un cilindro, la inercia (por rueda) se toma un elemento de masa que dista  $x$  del eje de rotación. El elemento es una capa cilíndrica cuyo radio exte-

rior es  $x+dx$ , y de longitud  $L$ . La masa  $dm$  la que contiene esta capa es:

$$dm = \frac{m_{rue}}{\pi R_{rue}^2 L} 2\pi x dx L = \frac{2m_{rue}}{R_{rue}^2} x dx \quad (1)$$

El momento de inercia del cilindro está en la ecuación "2" y "3":

$$J_c = J_{rue} = \int x^2 dm = \int \frac{2m_{rue}}{R_{rue}^2} x^3 dx = \frac{1}{2} m_{rue} R_{rue}^2 \quad (2)$$

$$J_{rue} = \frac{1}{2} m_{rue} R_{rue}^2 \quad (3)$$

Debido a que cada rueda esta motorizada esta relación anterior representa el momento de inercia para una traslación pura. Luego la energía cinética se puede representar como:

$$T_R(S) = T_R^{TRANS}(S) + T_R^{ROT}(S) \quad (4)$$

Para un movimiento de traslación y teniendo en cuenta que hay seis motores para seis ruedas se tiene la ecuación:

$$T_R(S) = \frac{1}{2} [6 \cdot m_{rot} + 6 \cdot m_{rue} + m_{resto-vehiculo}] \cdot X^2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot J_{rot} \cdot \varphi_{rot}^2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot J_{rue} \cdot \varphi_{rue}^2 \quad (5)$$

Se introduce la relación de transmisión de las ruedas y se deduce las inercias del eje del motor

$$T_R(S) = \frac{1}{2} [m_{TOTAL}] \cdot \left( \frac{R_{rue} \cdot \varphi_{rot}}{i} \right) \cdot \frac{1}{\eta} + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot J_{rot} \cdot \varphi_{rot}^2 + \frac{1}{2} \cdot 6 \cdot J_{rue} \cdot \left( \frac{\varphi_{rot}}{i} \right) \cdot \frac{1}{\eta} \quad (6)$$

Sacando factor común la velocidad de rotación del rotor del motor, de la expresión anterior se deduce la inercia total del vehículo reducida al eje del motor para un movimiento de traslación. En la Figura 5 se presenta el torque del motor versus el tiempo al alcanzar la velocidad deseada en el arranque y parada del mismo:

$$J_{TOTAL}^{TRANS} = \left[ 6 \cdot J_{rotor} + \frac{1}{i^2} \cdot (m_{TOTAL} \cdot R_{rue}^2 + 6 \cdot J_{rue}) \right] \quad (7)$$

Cuando un robot tiene más de tres ruedas se tiene una redundancia en las mismas.

La fuerza normal de las ruedas contra la pared de la tubería se puede modelar en:

$$N = K_{\alpha} (\Sigma F_{T1}) \quad (8)$$

donde:

$\Sigma F_{T1}$ : Es la fuerza aplicada por la estructura.

$K_{\alpha}$  : Es un coeficiente de incremento de fuerza. Y depende del tamaño de la estructura.

Para el movimiento de rotación de las ruedas se tienen las expresiones de las ecuaciones "9", "10" y "11":

$$F_T = Nf + mg \sin \beta \leq NP \quad (9)$$

$$P_e = F_T \frac{V_{\alpha}}{\eta} \quad (10)$$

$$Y F_T = \frac{6T_e i_n}{r_d} \quad (11)$$

En la que:

$F_T$  : Es la fuerza de tracción.

$P_e$  : es la potencia de salida del motor

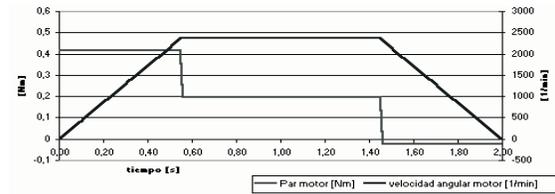


Figura 5. Evolución de la potencia mecánica para un movimiento lineal.

$T_e$  : es el par de salida del motor.

$i_n$  : Es una relación de velocidad.

$\eta$  : Es la eficiencia total.

$r_d$  : es el radio de las ruedas motrices.

$V_{\alpha}$  : es la velocidad.

$f$  : es el coeficiente de resistencia de fricción rodante.

$\varphi$  : es el coeficiente de adhesión.

$\beta$  : es el ángulo de inclinación del tubo.

Los resultados "10" y "11" se aplican a una condición de tracción pura sin deslizamiento. Debido a que los factores no estructurados que son las presiones totales y parciales de las ruedas contra la tubería afectan la estabilidad de la adherencia a la misma y las eficiencias de la potencia de salida. La tasa de deslizamiento y el coeficiente de adherencia tienen una relación directa como se presenta en la ecuación anterior.

Con los valores obtenidos se seleccionaron los motores sobredimensionados para que el robot pueda trepar en la tubería petrolera sin dificultad y pueda llevar carga (cámara, sensores, etc.). Se le colocaran seis motores DC que le den tracción a las ruedas para permitir que este escale con facilidad.

### Primer prototipo desarrollado

Una vez consideradas todas las necesidades de la aplicación y habiendo realizado el análisis de la estructura se construyó el primer prototipo del robot. En la Tabla 3 se describen las características constructivas del robot.

Para el robot se utilizaron seis (6) micro motores pololu Relación engranajes: **298:1** Dimensiones Tamaño: 24 × 10 × 12 mm Peso: 9.63 gramos. 100:1 **Micro Metal Gearmotor HP #1101** de alto torque (2.5Kg/cm), con su base y encoder

pololu acoplados a seis (6) ruedas Pololu de poli-propileno con buena tracción utilizadas en coches de control remoto. En la Figura 6 (a y b) se muestra una fotografía del servomotor y la rueda junto con el encoder que cierra el lazo de control.

En la Figura 7 se presenta el primer prototipo en la tubería en el laboratorio, la tubería mostrada se corresponde con una de los estándares utilizados en la extracción del petróleo.

Los micro-motores son controlados por dos reguladores PD los cuales indicarán el ancho de pulso correspondiente que hay que aplicar a los motores. Los PD son implementados por software (lenguaje C).

#### 4. Implementación: hardware de control

Los micro motores que dan movimiento al robot así como los sensores para la recogida de datos son controlados mediante el SBC (Single Board Computer) Wildfire 5282.

Esta tarjeta lleva embebida un microprocesador Coldfire de Motorola. También son implementados todos los puertos necesarios para el control del robot así como un puerto RJ-45 para la comunicación vía TCP/IP con el ordenador del usuario. En la Figura 8 se muestra una fotografía de la tarjeta.

Los puertos digitales de la tarjeta Wildfire se utilizan para controlar los "puente en H" que llevarán acoplados los motores. El circuito de potencia de los motores consta de un circuito integrado SN14L74 para amplificar la tensión proveniente de la tarjeta de 3.3V a 5V y de un circuito L293B, que contiene los puentes en H.

La tarjeta Wildfire instalada en el robot permitirá la consecución de las siguientes funciones:

- Control de la velocidad de los motores mediante PWM.
- Implementación de los PD necesarios para controlar el comportamiento de los motores.
- Recepción de las señales de los sensores.

El hardware de control debe enviar tanto la información relativa al estado del robot y de su entorno así como recibir los comandos que el usuario le envíe. Se prefiere la conexión vía TCP/IP porque es más rápido que otras conexiones por ejemplo vía Serial y además posee control de paquetes de datos.

Mediante la librería de OpenTCP, se ha implementado en el software de la tarjeta los sockets necesarios para llevar a cabo estas tareas. La codificación del software está hecha en C.

#### Interfaz gráfica

Uno de los principales elementos de esta aplicación es la interfaz visual y de control del operador. Esta permite el flujo de información desde la estación de control, en la que se sitúa el ingeniero de petróleo, hacia el robot y viceversa.

Durante el desarrollo normal de la tarea, el robot descenderá hacia el pozo a través de la tubería por lo tanto es imposible mantener el contacto directo con él. La importancia de esta interfaz radica en el hecho que el operador será capaz de observar en tiempo real la evolución de diversas variables físicas.

La interfaz está desarrollada en C++ bajo la concepción de la programación orientada a obje-

Tabla 3. Características del robot

Característica	Peso	Longitudes	Espesor	Diámetro
Cantidad	611 gramos	42 cm	35mm(ruedas)	160mm a 200mm

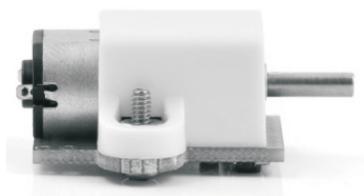


Figura 6(a). El Servo-motor y reductora Micro Steel de Pololu. En 6(b) la rueda con el encoder.

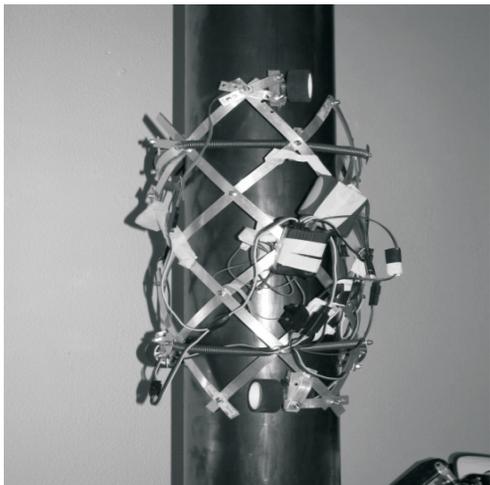


Figura 7. Fotografía del primer prototipo desarrollado.

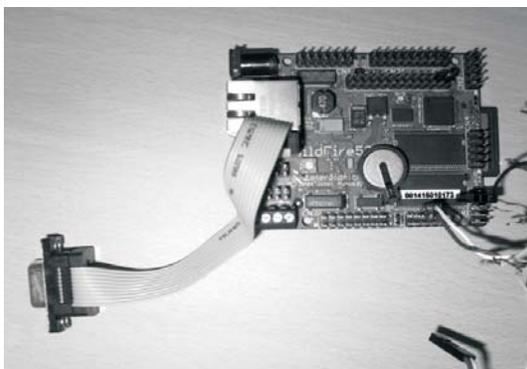


Figura 8. Tarjeta Wildfire 5282.

tos y en un entorno Windows. En la Figura 9 se muestra una captura de imagen de la interfaz desarrollada. Tal como puede apreciarse la interfaz permite la visualización en tiempo real de las imágenes captadas por la cámara del robot. En la siguiente sub-sección se describen brevemente las funcionalidades de la interfaz.

### Funcionalidades de la interfaz

Las diferentes finalidades de esta interfaz quedan definidas en los siguientes puntos: simulación del entorno del robot, teleoperación libre mediante joystick, teleoperación mediante asignación de coordenadas, control del estado de la conexión TCP/IP con el robot, toma de imágenes de la cámara insertada en el robot, toma de datos de los sensores y representación gráfica de los mismos.

A continuación se detallará el contenido de cada uno de los objetivos de la interfaz.

### Simulación del entorno del robot

Para simular el movimiento real del robot en la tubería se ha dispuesto de una imagen simulada en la pantalla principal de la interfaz, en la que se muestra una estructura desplazándose a la misma velocidad que el robot real. La simulación del entorno está desarrollada mediante OpenGL (Open Graphics Library). La API de OpenGL permite dibujar gráficos tanto en 2D como en 3D.

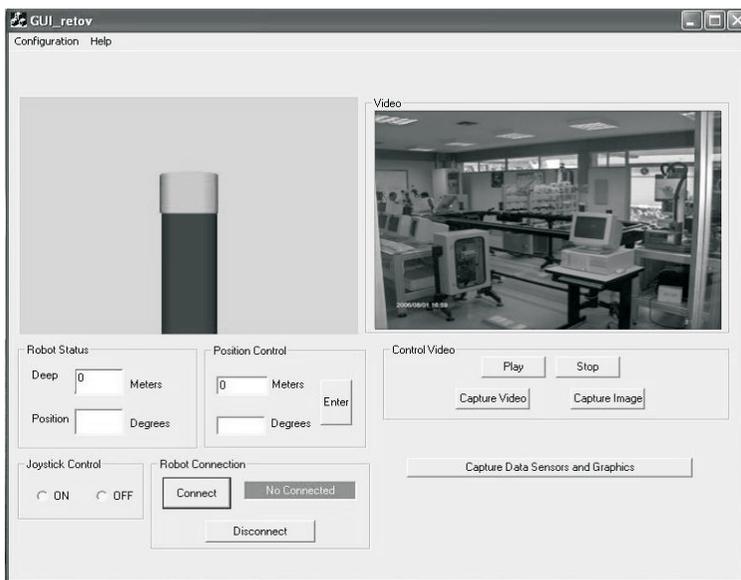


Figura 9. Imagen de la interfaz.

En el entorno virtual y de forma conceptual se representan los elementos principales que forman parte del escenario. Uno de ellos es la tubería de la bomba del pozo, lugar por donde descenderá el robot. La aplicación gráfica recibirá, vía TCP/IP, la posición de los motores por parte del hardware incluido en el robot. Con ese dato actualiza la posición del robot virtual dentro de la simulación.

#### **Teleoperación libre mediante Joystick**

En este modo el usuario puede controlar el comportamiento del robot usando el joystick. Al activar esta opción el joystick queda enlazado a la aplicación. Siempre y cuando se tenga pulsado el botón de hombre muerto la posición del joystick será procesada por la aplicación. Dependiendo de esta posición la interfaz enviará paquetes por TCP/IP al hardware del robot indicándole qué tipo de movimiento y a qué velocidad se ha de realizar. En caso de soltar el botón emergencia se enviará la señal de paro de los motores al robot. Las diferentes posibilidades del control del movimiento del robot son: ascenso, descenso.

#### **Teleoperación mediante asignación de coordenadas**

En este modo el usuario podrá especificar unas coordenadas y enviárselas al robot para que éste vaya a esa posición.

Las coordenadas a introducir serán la profundidad a la que se dirigirá el robot. Estas coordenadas se enviarán vía TCP/IP al hardware del robot para su ejecución.

Cabe destacar que la interfaz gráfica permite al usuario conectarse con el hardware del robot. De esta forma la aplicación puede enviarle datos del control de movimiento al robot y éste a su vez le enviará su estado y la información de los sensores.

La conexión se realiza bajo el protocolo TCP/IP. La interfaz le indicará al usuario el estado de la conexión con el robot así como permitirle reconectar en caso de error.

#### **Toma de datos e imágenes**

La interfaz gráfica recibirá video de la cámara instalada en el robot. De esta forma el usuario podrá ver en tiempo real lo que ocurre en la profundidad del pozo y actuar en consecuencia.

### **Comunicación con el robot**

Para que el usuario pueda controlar y adquirir datos del robot la interfaz debe estar conectada a éste. Con tal fin la comunicación se desarrolla bajo sockets haciendo uso de la clase CSocket de Windows. El protocolo de comunicación usado es TCP/IP. En la Figura 10 se muestra un diagrama de bloques de la conexión. La información que la interfaz ha de enviar es:

- Velocidad los diferentes motores (en caso de tele operación libre).
- Posición a la cuál debe dirigirse el robot (en caso de tele operación por coordenadas).

La información que debe recibir la interfaz es:

- Medidas de todos los sensores instalados.
- Información de los encoder de los motores.

En la Figura 10 se puede observar que la conexión entre la cámara y la interfaz visual es a través de un cable USB. Este tipo de comunicación es adecuada para el prototipo de laboratorio (ver Figura 7). La versión definitiva contempla el uso de la fibra óptica.

### **Resultados**

La estructura diseñada puede desplazarse por la tubería vertical y su diseño basado en tenseguridad le permite, con la propia estructura, fijarse a la tubería sin utilizar otro mecanismo de sujeción.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con RETOV. En la Tabla 4, se muestran los tiempos y las velocidades alcanzadas por el robot durante el ascenso y descenso. La prueba se realizó desplazándolo 2 metros para poder calcular la velocidad alcanzada por el robot. En la Figura 11 se presenta una secuencia fotográfica tomada durante las pruebas de ascenso y descenso del robot.

Adicionalmente en la Figura 11, se realizó una prueba extra colocándole al robot una carga de 500 gramos sobre la estructura. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en velocidad y tiempo. Si se comparan los resultados de las Tablas 4 y 5 se puede observar que el tiempo de ascenso se incremento en 48 segundos, mientras que en descenso se incremento en 17 segundos como era de esperarse ya que para el

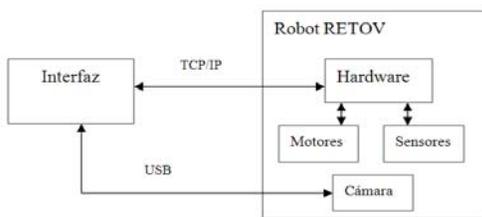


Figura 10. Conexión entre la interfaz y el robot.

Tabla 4. Ensayo realizado con RETOV sin carga

	Tiempo	Velocidad
Ascenso	1 min	0,0167m/s
Descenso	0,98 min	0,0163m/s

Tabla 5. Ensayo realizado con RETOV con una carga 500 gramos

	Tiempo (min)	Velocidad
Ascenso	1,48 min	0,0926 m/s
Descenso	1,15 min	1,133 m/s

ascenso el peso de la carga disminuye la velocidad del mismo.

### Conclusión

En este artículo se presentó el desarrollo del primer prototipo del robot RETOV (Robot en tubería de Operación Vertical): una estructura robótica capaz de desplazarse por una tubería petrolera midiendo ciertas variables de interés que afectan al buen desempeño de los elementos que integran el proceso de extracción de Petróleo.

El diseño mecánico del robot se basa en los conceptos de tensegrity con lo que se logra una estructura con bajo peso, deformable para adaptarse a la tubería y con la rigidez que se necesita para poder contener en ella el conjunto de sensores que debe llevar el Robot.

Cabe destacar que en las pruebas realizadas el robot tuvo en buen desempeño tanto en movimiento libre como en movimiento con carga lográndose en ambos casos velocidades más que aceptables.

Actualmente los autores están trabajando en el segundo prototipo caracterizado por anillos.



Figura 11. Secuencia de fotografías con los resultados con una carga de 500 gramos.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo económico a la Universidad del Zulia y al Ministerio de Ciencia e Innovación (DPI2009-08778), a la Comunidad de Madrid (RoboCity 2030 II) y a BCP-VEN por la información suministrada.

## Referencias bibliográficas

1. Zhongwei Wang, Qixin Cao, Nan Luan and Lei Zhang: Development of new pipeline maintenance system for repairing early-built offshore oil pipelines (2008), IEEE.
2. Weimin Shen, Jason Gu and Yanjun Shen: Proposed Wall Climbing Robot with Permanent Magnetic Tracks for Inspecting Oil Tanks. IEEE Conference on Mechatronic and Automation. (2005), 2072-2077.
3. M. Armada, P. Gonzalez de Santos: "Climbing, walking and intervention robots", Industrial Robot, Vol. 24, No. 2, (1997) 158-163.
4. Fuller, R: B: "Tensile-Integrity Structures" U.S. Patent 3,063,521. (1962).
5. Robert William Burkhart: A Practical Guide to Tensegrity Design, Cambridge USA. (2008).
6. Rafael Vásquez, Julio Correa: Sistemas Tensegricos: Alternativas para la robótica. IEEE Workshop on Robotics and Automation CWRA. (2005).
7. Valentin Gomez Jauregu. Tensegridad: Estructuras Tensegricas en Ciencia y Arte. Universidad Cantabria. Santander (2007) 103.
8. Jahan Bayat, Carl D. Crane III: Closed-Form Equilibrium Analys of Planar Tensegrity Mechanisms, Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR (2006).
9. Jahan Bayat, Carl D. Crane III: Kinematic Analysis of a Planar Tensegrity Mechanism. Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR (2007).
10. J.B. Aldrich and R.E. Skelton: Time-energy optimal control of hyper-actuated mechanical systems with geometric path constraints. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference (2005), 8257-8256.
11. Ch. Grand, Ph. Bidaud, N. Jarrasse: Design of innovative unfoldable Wheel with contact surface adaptation mechanism for planetary rovers. III Proceeding of the (th ESA workshop on Advanced Space Technologies for Robotics And automation (2006), 1-8.
12. Ch. Grand, Ph. Bidaud, N. Jarrasse: Innovative concept of unfoldable Wheel. 12th IFToMM Word Congress, Besancon (2007), 18-21.
13. María Urdaneta y Roque Saltaren: Estudio del Sistema de tracción de una estructura robótica para tuberías en Sistemas de Extracción Petrolera con BES y BCP. XXIX Jornadas CEA (2008).
14. Marcelo Hirschfeldt: Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas. OilProduction.net. (2008).

Recibido el 7 de Abril de 2011

En forma revisada el 24 de Septiembre de 2012