

## Estructura Robótica Pre-Tensada para Robot en Tuberías Petroleras

María Alejandra Urdaneta <sup>\* a</sup>, Cecilia García <sup>b</sup>, Roque Saltaren <sup>b</sup>, Gustavo Contreras <sup>c</sup>, Rubén Ugarte <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Control y Electrónica, Ingeniería Eléctrica. Universidad del Zulia Venezuela. Av. Cecilio Acosta, 4001, Maracaibo, Venezuela

<sup>b</sup> Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, n°2, 28006, Madrid, España.

<sup>c</sup> Técnicas Reunidas, Las tablas edificio Bami, 28050 Madrid, España

### Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un robot basado en la estructura Pre-Tensada con el fin de realizar tareas de inspección y mantenimiento en tuberías petroleras. 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 verticalmente y 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; por lo tanto, la importancia de esta investigación radica en que el robot incorpora una red de sensores específicos para medir aquellas variables que puedan interferir en el funcionamiento normal de las bombas. Además, este robot permite automatizar la recuperación de objetos que pueden caer al pozo durante la instalación y mantenimiento del mismo, actualmente este proceso es manual.

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. *Copyright IFAC 2012. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados*

### Palabras Clave:

Pre-Tensada, Robot Tubería Vertical, Bombas Electro Sumergible, Bomba de Cavidad Progresiva.

### 1. Introducción

Las estructuras pre-tensadas son aquellas cuya resistencia, estabilidad y seguridad son fijadas desde su fabricación, a través de la creación de esfuerzos permanentes en la propia estructura. Dentro de las estructuras pre-tensadas destaca la estructura “tensegrity”, en la que se basó el desarrollo de este robot.

La tensegridad es un término arquitectónico acuñado por Buckminster Fuller (Burkhardt y Fuller, 1962) como contracción de “tensional” e “integrity” (integridad tensional). Se define como la característica que exhiben determinadas estructuras, cuya estabilidad depende del equilibrio entre fuerzas de **tracción** y **compresión**. Generalmente la estructura tensegrity se conforma de elementos elásticos llamados tendones (ties) y barras (struts), que interactúan entre sí (Vásquez y Correa, 2005).

Uno de los principales beneficios que presenta este tipo de estructura es la excelente capacidad de absolver energía con un mínimo uso de materiales que las hace muy livianas. Propiedad que es de gran importancia para nuestra aplicación.

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” (Gómez, 2007) dependiendo de si hay o no contacto entre las barras.

Con este tipo de estructuras se han realizado robot para diferentes aplicaciones, tales como robot con estructura planar y robot móvil entre otros ( Bayat y Crane III, 2006, 2007; Baker, 2005; Jager y Skelton, 2001; Aldrich y Skelton, 2005; Shibata et al, 2009; Shai et al., Uri Ben-Hanan, 2009, Aldrich et al., 2003 y Chandana et al., 2006). En la Figura 1 se muestra la una estructura tensegrity similar a la 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 hacia los bordes o puntos de apoyo de la estructura. La estructura gausseana, Figura 1b, posee un efecto de fuerzas negativo, es decir hacia dentro y no hacia fuera de la estructura, efecto aprovechado en esta aplicación, ya que permite que la estructura diseñada se “abraza” fuertemente a la tubería y lograr robotizarla para esta aplicación.

En este artículo se presenta el primer prototipo de un robot para tuberías de operación vertical basado en los conceptos de

\* Autor de Correspondencia

Correos electrónicos: [urdanetatoo@gmail.com](mailto:urdanetatoo@gmail.com) (María Urdaneta)  
[cecilia.garcia@upm.es](mailto:cecilia.garcia@upm.es) (Cecilia García)

tensegrity en la que se han introducidos modificaciones de consideración para poder adaptarla a la aplicación, sin embargo estas modificaciones conservan las propiedades mecánicas de la estructura, permitiéndonos tener una estructura pre-tensada.

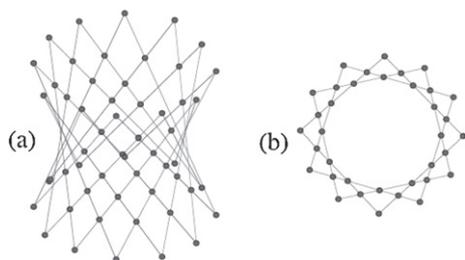


Figura 1: a) Estructura hiperboloide. b) Estructura flexionada. (Fuente: Connelly, 2009)

Este robot no sólo podrá desplazarse a alta velocidad por la tubería debido a su bajo peso, sino que además se puede adaptar a los diferentes diámetros de tuberías siendo posible su utilización en todos los pozos de extracción. Además, se prevé que el robot cuente 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 (Urdaneta y Saltaren, 2008).

La Figura 2 muestra una vista en CAD del primer prototipo desarrollado. Tal como se puede observar, el diseño contempla una estructura tipo tijera (Grand et al, 2006 y 2007) que permite al robot amoldarse al diámetro de la tubería. En la Figura 3 se muestra otra vista CAD del robot sobre la tubería por la cual debe desplazarse.

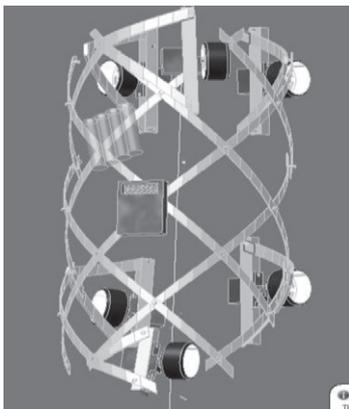


Figura 2: Vista CAD del Robot en Tuberías de Operación Vertical (RETOV)

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se describe brevemente el entorno de trabajo del robot y la problemática que se pretende resolver con este novedoso dispositivo robótico. En la Sección 3 se presentan las consideraciones de diseño y la metodología utilizada para la elaboración del prototipo. En la Sección 4 se desarrolla el análisis estático de fuerzas de la estructura robótica. En la Sección 5 se presenta la implementación práctica realizada mientras que en la Sección 6 se analizan los resultados obtenidos con dicha estructura. Finalmente, se comentan las conclusiones y recomendaciones de futuros trabajos.

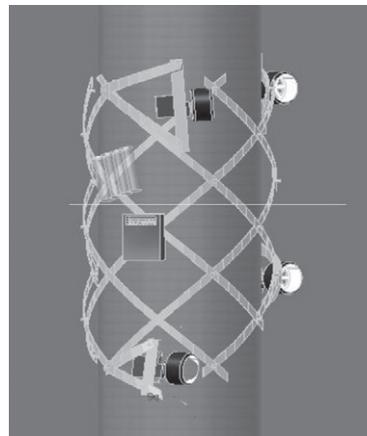


Figura 3: Vista CAD del Robot en la Tuberías

## 2. Entorno de Trabajo del Nuevo Desarrollo

En los pozos petroleros se pueden encontrar dos tipos de bombas (Figura 4): 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 y 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 4a). Puede ser instalada hasta profundidades de 8000 pies, manejando flujos cercanos a los 4000 barriles por día, dependiendo de su configuración, diámetro y velocidad de giro. Las BES trabajan a mayores profundidades que las BCP llegando hasta profundidades de 12.000 pies con una producción que puede alcanzar los 12mil barriles diarios dependiendo del pozo (Figura 4b).

En los últimos años se han reportado diferentes trabajos tendientes a incluir a robots en diferentes aplicaciones en tuberías. (Shen et al., 2005), (Wang et al., 2009), (Baghani et al., 2005), (Wang y Fengyu Xu, 2007 y 2008). Estos robots, diseñados para trabajar en superficies verticales, están teleoperados y se utilizan exitosamente en las tuberías, ductos de drenaje, oleoductos, tanques etc. (Ocaña, 2008).

Actualmente los pozos petroleros disponen de sensores fijos que inevitablemente se deterioran por estar expuestos constantemente a las condiciones del pozo, cuando estos se dañan el pozo queda sin equipo de medición. El robot propuesto permite incorporar en su estructura los sensores necesarios para la medición en el pozo y así evitar el daño de la bomba en el pozo. Adicionalmente, los sensores a bordo del robot pueden ser fácilmente sustituidos en caso de dañarse debido a las condiciones en el pozo. Este robot incorpora además una cámara de visión nocturna para la inspección visual del estado del pozo por los operarios de tierra. Esta novedad plantea un importante avance en el mantenimiento de los mismos

Adicionalmente, la estructura robótica se le podría añadir dos brazos seriales desplegados dispuestos convenientemente. Esto permitirá que el personal en tierra recuperar los objetos caídos en el pozo teleoperando dichos brazos. Actualmente este proceso es totalmente manual y los operadores de tierra deben recuperar los objetos caídos en el pozo a ciegas y con la ayuda de pinzas

mecánicas. En este punto es necesario destacar que en caso que un objeto no pueda ser recuperado, el pozo se clausura completamente y debe realizarse una nueva perforación en zonas aledañas. Consecuentemente, las mejoras introducidas con este robot en el proceso de recuperar son evidentes. Finalmente debe mencionarse que la estructura propuesta puede ser utilizada en pozos de diferentes dimensiones con lo que se reducen considerable los costos en la extracción petrolera.

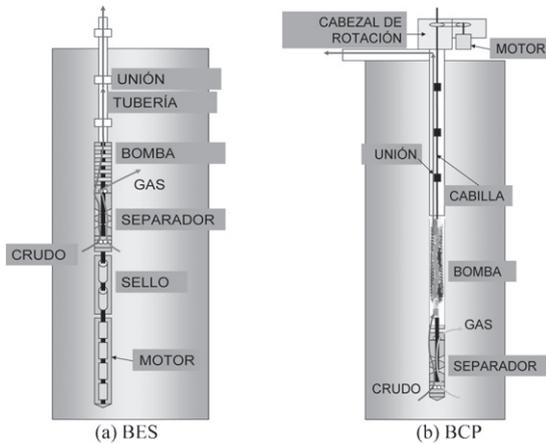


Figura 4: Bombas utilizadas en las estaciones extractoras de petróleo.

### 3. Consideraciones y Metodología 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 se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

- Las condiciones que tendría dicha estructura dentro del pozo petrolero;
- Que sea adaptable a los diferentes diámetros de tubería;
- Que debe desplazarse entre una tubería de acero (tubing) y las paredes del pozo (casing).

La distancia entre el “tubing” y el “casing” se denomina *anular* (Hirschfeldt, 2008) y esta distancia es clave en el dimensionamiento de la estructura. En el Apéndice A se presenta una tabla que relaciona dichas distancias para algunos pozos tipos. En dicho Apéndice, 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. La dimensión máxima del robot, que es donde están situadas las ruedas es de 35mm. Adicionalmente, esta tubería no presenta codos, es decir, no tendrá que superar ángulos de 90 grados, y 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 1 se resumen las consideraciones de diseño más relevantes tenidas en cuenta, obtenidas de una encuesta realizada a expertos en el área petrolera, utilizando la metodología QDF (Quality Function Development) (Urdaneta y Saltaren, 2008).

Tabla 1: Criterios de Diseño

| Variable   | Consideraciones de diseño      |
|------------|--------------------------------|
| Sistema de | Ruedas desplazamiento vertical |

|             |   |
|-------------|---|
| tracción    |   |
| Temperatura | Selección de material del receptáculo con aislamiento térmico para contener la electrónica interna del robot, que soporte temperatura (hasta 400°(F)) y en condiciones a prueba de explosión. |
| Dimensiones | 5 cm adherido a la tubería  |
| Velocidad   | Capaz de desplazarse entre 8000 y 12000 pies. A una velocidad adecuada  |

Como ya se ha mencionado, uno de los principales requisitos que se le imponen al robot es que 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. El diseño basado en la estructura tensegrity asegura que la estructura sea rígida y al mismo tiempo liviana. Consecuentemente, el robot podrá desplazarse a alta velocidad a través de la tubería siendo las ruedas el único punto de contacto. Para asegurar la estabilidad de la estructura (Kwon et al, 2007), las ruedas deben situarse a 120° y de esa forma se cubren 240° grados del tubo (Figura 5).

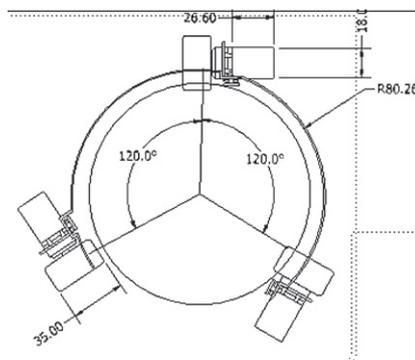


Figura 5: Estructura Robótica con sus ruedas colocadas cada 120 grados.

El objetivo del análisis presentado en esta sección no es otro que dimensionar los motores que se necesitan para accionar el robot y seleccionar adecuadamente las ruedas con las que se desplazará sobre la tubería.

Durante el movimiento ascendente, descendente o helicoidal del robot sobre la tubería, las ruedas deben permanecer perpendicular a ésta y, además, deben estar en contacto con dicha superficie.

### 4. Análisis Estático de la Estructura del Robot

El análisis estático se realizará suponiendo que el robot realiza un movimiento ascendente, ya que en este caso además de su propio peso, debe oponerse a la gravedad. Por lo tanto, el robot se desplaza en la dirección Z (Figura 6).

Para el análisis se considerará que cada rueda es accionada por un único motor y, además, que las ruedas y los motores son iguales. Por lo que, sin perder generalidad, el análisis se realizará para una rueda y el resultado será extrapolado a las cinco ruedas restantes. En la Figura 6 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la estructura robótica diseñada.

Sea  $N$  la fuerza normal ejercida por las ruedas sobre la tubería. Dicha fuerza puede modelarse sumando las fuerzas normales ejercidas por cada rueda,  $N_i$ , y por la fuerza que la estructura ejerce sobre tubería según se muestra en la ecuación (1):

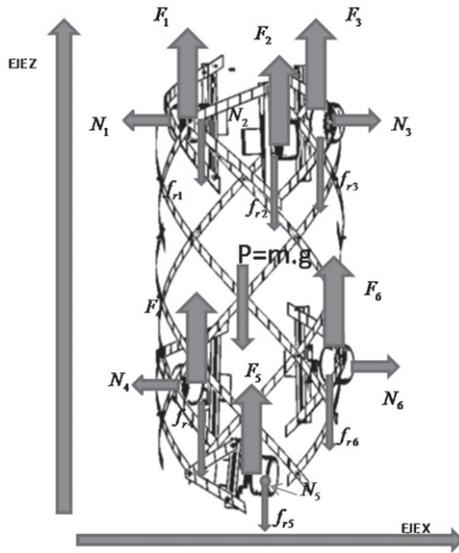


Figura 6: Diagrama de cuerpo libre de la estructura robótica propuesta.

$$N = \sum_{i=1}^n N_i + K_{\alpha} n F_{T1} \quad (1)$$

Donde  $i=1, \dots, n$ , siendo  $n$  la cantidad de ruedas del robot,  $F_{T1}$  es la fuerza aplicada por la estructura,  $K_{\alpha}$  es un coeficiente de incremento de fuerza que depende del tamaño de la estructura.

Para calcular las dimensiones mínimas de los motores que accionarán cada rueda, debe considerarse los parámetros del motor y la fuerza  $N$ , dada en la ecuación (1).

Si se supone que las ruedas giran sin deslizamiento, será posible calcular la fuerza de tracción de manera directa.

Para lograr desplazar la estructura sobre la tubería sin perder el contacto con la misma, la sumatoria de la fuerza de tracción de los motores,  $F_i$ , debe ser mayor o igual al peso del robot más los sensores. La fuerza de tracción  $F_T$  se calcula como:

$$F_T = Nf + m g \sin \beta \leq \sum_{i=1}^n F_i \quad (2)$$

Donde  $f$  es el coeficiente de resistencia de fricción rodante,  $\beta$  es el ángulo de inclinación del tubo,  $m$  es la masa de la estructura,  $g$  es la constante de gravedad.

Una vez calculada la fuerza de tracción según la ecuación (2), la potencia mínima,  $P_e$ , que debe tener el motor se obtiene del siguiente modo:

$$P_e = F_T \frac{V_{\alpha}}{\eta} \quad (3)$$

Donde  $F_T$  se calcula según la ecuación (2),  $\eta$  es la eficiencia del motor y  $V_{\alpha}$  es la velocidad máxima que se desea alcanzar. Considerando que las seis ruedas y los seis motores son iguales se tiene que la fuerza de tracción en la ecuación (3) será:

$$F_T = \frac{6T_e r}{r_d} \quad (4)$$

Donde  $T_e$  es el par de salida del motor,  $r$  es una relación de velocidad de la reductora y  $r_d$  es el radio de las ruedas motrices.

Con los valores obtenidos (Tabla 2) se seleccionaron los motores sobredimensionando para que el robot pueda trepar por la tubería petrolera sin dificultad y pueda llevar carga (cámara, sensores, etc.).

Tabla 2: Característica de los motores

| Característica                        | Valor       |
|---------------------------------------|-------------|
| Radio de la rueda motriz(rd)          | 1.75 (cm)   |
| Relación de velocidad de la reductora | 298:1       |
| Torque del motor                      | 2,5 (Kg/cm) |

#### 4.1. Modelo de las Ruedas

Para poder calcular el par resistente se necesitan las reacciones contra la tubería, pero no se dispone de suficiente información geométrica como para calcular estos valores con precisión. En cualquier caso, se espera obtener una configuración bastante simétrica.

Los límites de adherencia de las ruedas a la tubería se pueden aproximar mediante la ecuación (5)

$$L_{\max} = N\mu = L \quad (5)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción. En el Apéndice B se presenta una tabla con los valores típicos para este coeficiente.

La ecuación (6) permite calcular el par del motor necesario para mover la estructura robótica

$$\Gamma_{\text{motor}} = J_{\text{motor}} \ddot{\varphi}_{\text{motor}} + \Gamma_{\text{res}} \quad (6)$$

Donde  $\Gamma_{\text{motor}}$  es el par motor,  $J_{\text{motor}}$  es la inercia del motor,  $\ddot{\varphi}$  es la aceleración del motor y  $\Gamma_{\text{res}}$  es el par resistente del motor.

El par resistente del motor,  $\Gamma_{\text{res}}$ , se calcula como:

$$\Gamma_{\text{res\_motor}} = \frac{\Gamma_{\text{res\_rueda}}}{r \eta} \quad (7)$$

Donde  $\Gamma_{\text{res\_rueda}}$  es el par resistente de la rueda dado en la ecuación (8)

$$\Gamma_{\text{res\_rueda}} = (\Gamma_{\text{trac}} + \Gamma_{\text{rod}} + \Gamma_{\text{piv}}) C_s \quad (8)$$

Donde  $\Gamma_{\text{trac}}$  es el par resistente de tracción,  $\Gamma_{\text{rod}}$  es el par de rodadura  $\Gamma_{\text{piv}}$  es el par de resistente al pivote y contempla la resistencia que opone la rueda al hacerla girar verticalmente,  $C_s$  es un coeficiente de seguridad que intenta abarcar el resto de los comportamientos difícilmente modelables incluyendo la propia estructura, y asegurar el comportamiento del sistema incluso en las condiciones más adversas dentro de los límites de las especificaciones y las tolerancias de fabricación.

El par resistente de tracción es debido básicamente a las fuerzas longitudinales aplicadas sobre la rueda, mientras que el par de rodadura es debido al movimiento de avance de la rueda sobre la superficie. La resistencia a la rodadura corresponde únicamente a la flexión de las ruedas, al peso que gravita sobre las ruedas y la fuerza que ejerce la malla sobre las ruedas. Únicamente está limitado al efecto de la superficie de contacto sobre la rueda y no contempla las fricciones internas del grupo motriz.

La Figura 7 muestra el diagrama de esfuerzos correspondientes a una rueda en contacto con la superficie de la tubería.

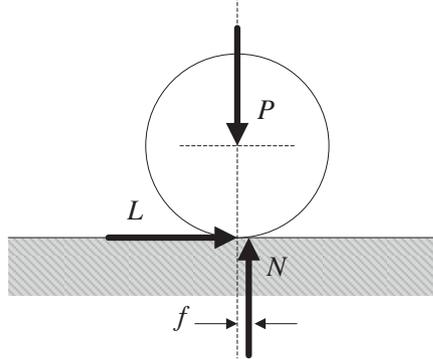


Figura 7: Diagrama de esfuerzos sobre una rueda en un plano vertical.

El par resistente de tracción se puede expresar como:

$$\Gamma_{trac} = r_d L \quad (9)$$

Como se muestra en la (Figura 7), la flexión del recubrimiento de las ruedas provoca que el contacto entre esta y el tubo no sea puntual. Con el movimiento de la estructura la normal ( $N$ ) queda desplazada, y este desplazamiento entre  $P$  y  $N$  genera el par de rodadura  $\Gamma_{rod}$ . Debido a la dificultad del cálculo exacto en base a la teoría de Hertzio, y de la reducida mejora en la precisión que proporcionaría, generalmente se modela el par de rodadura como:

$$\Gamma_{rod} = f N \quad (10)$$

Donde  $f$  es el coeficiente de fricción de la rodadura, con unidades de longitud, que generalmente proporciona el fabricante o se obtiene de forma experimental. El valor de este coeficiente esta acotado superiormente por el radio real de la superficie de contacto, calculable de forma más sencilla mediante la teoría de Hertz; de este modo se tendría un valor teórico a partir de las características de los materiales en contacto, pero con un coeficiente de seguridad demasiado elevado debido a que la normal no se sitúa en el perímetro de la superficie de contacto, sino en el interior de ella.

En este punto sólo queda definir la consigna introducida en el motor para poder calcular el par necesario en cada caso, y monitorizar la evolución a lo largo de los ciclos de trabajo. Si además se conocen las constantes eléctricas del motor, se puede simular igualmente el perfil de alimentación del motor (tensión y corriente para realizar el control del mismo). Uno de los perfiles de movimiento más utilizados en robótica es el perfil de movimiento trapezoidal mostrado en la Figura 8. En este perfil de movimiento se tiene como objetivo recorrer una distancia  $d$ , en un intervalo de tiempo  $t$ , partiendo desde el punto de inicio con una velocidad cero y llegando al punto final del recorrido también con una velocidad cero. El perfil se caracteriza además por emplear el mismo tiempo en aceleración y en desaceleración.

La velocidad máxima que el robot podrá alcanzar durante un movimiento ascendente por la tubería se calcula como:

$$V_{m\acute{a}x} = \left( \frac{d}{\frac{1}{2}t_a + t_c + \frac{1}{2}t_d} \right) \quad (11)$$

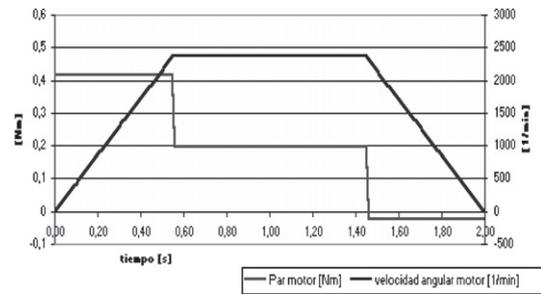


Figura 8: Evolución de la potencia mecánica para un movimiento lineal.

Donde  $t_a$  es el tiempo de aceleración del robot,  $t_d$  es el tiempo de desaceleración del robot ( $t_a = t_d$ ),  $t_c$  es el tiempo de recorrido del robot,  $d$  es la distancia recorrida por el robot.

La aceleración máxima se determina por:

$$a_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{t_a} \quad (12)$$

## 5. Primer Prototipo Desarrollado

Una vez consideradas todas las necesidades de la aplicación y habiendo realizado el análisis estático de la estructura se construye el primer prototipo del robot. En la Tabla 3 se describen las principales características constructivas del robot y en la (Figura 9) se muestra una fotografía del mismo. Cabe destacar que la tubería mostrada se corresponde con uno de los estándares utilizados en la extracción del petróleo.

Tabla 3: Característica del robot

| Característica | Cantidad          |
|----------------|-------------------|
| Peso           | 611(gramos)       |
| Longitud       | 42(cm)            |
| Espesor        | 2,5 (Kg/cm)       |
| Diámetro       | 160(mm) a 200(mm) |

Para el robot se utilizaron seis (6) micro motores Pololu Relación engranajes: 298:1 Dimensiones Tamaño: 24 x 10 x 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 ruedas Pololu de polipropileno con buena tracción utilizadas en coches de control remoto. En la Figura 10a 10b se muestra una fotografía del servomotor y la rueda junto con el encoder que cierra el lazo de control.

Los micro-motores son controlados por los reguladores PD los cuales indicarán el ancho de pulso correspondiente que hay que aplicar a los motores. Uno de ellos será necesario para controlar el ascenso y descenso del robot y el otro es usado para controlar la rotación del robot sobre su eje.

### 5.1. Hardware de Control

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



Figura 9: Fotografía del Robot en Tuberías de Operación Vertical (RETOV)

Esta tarjeta lleva embebida un microprocesador Coldfire de Motorola. En ella están también 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 11 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.

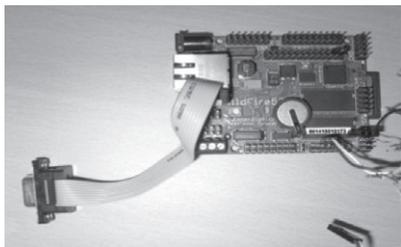


Figura 11: Tarjeta Wildfire 5282.

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.
- Envío y recepción mediante TCP/IP de los comandos del usuario como la información del entorno del robot respectivamente.

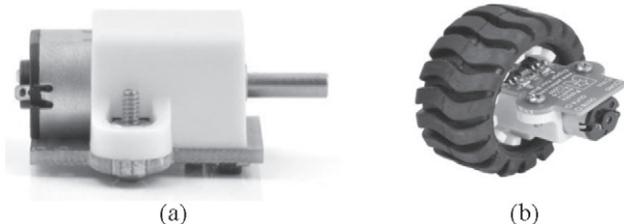


Figura 10: (a) Servo-motor y reductora (b) rueda con el encoder acoplado.

El hardware de control está diseñado para el envío de la información relativa al estado del robot y su entorno, como así también debe permitir la recepción de los comandos que el usuario le envíe. Para ello se utiliza una conexión TCP/IP, que es más rápida que otras conexiones disponibles en la tarjeta (RS232, por ejemplo). El software de comunicación se realizó en lenguaje C.

## 5.2. 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 presentes en el pozo y, dependiendo de los valores de las mismas, será capaz de tomar decisiones para proteger al pozo y a sus componentes.

La interfaz está desarrollada en C++ bajo la concepción de la programación orientada a objetos y en un entorno Windows. En la Figura 12 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.

## 5.3. Funcionalidades de la Interfaz Visual

Como se ha indicado en la introducción, la interfaz gráfica permitirá tener un control del robot. 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.

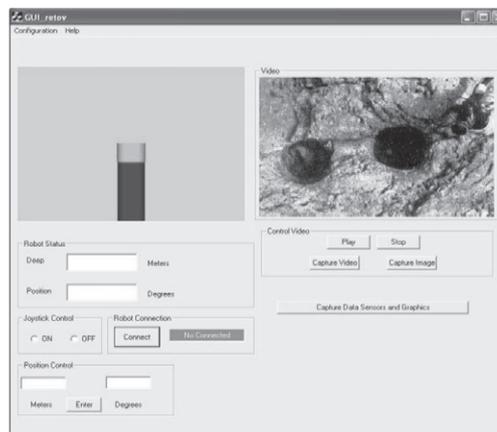


Figura 12: Imagen de la interfaz.

### 5.3.1 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). 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. Otro, es el propio robot. En la Figura 12 se pueda observar el entorno simulado.

La aplicación gráfica recibirá, vía TCP/IP, la posición de los motores por parte del hardware incluido en el robot. Con ese dato podrá actualizar la posición del robot virtual dentro de la simulación.

### 5.3.2 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 de hombre muerto se enviará la señal de paro de los motores al robot. Las diferentes posibilidades del control del movimiento del robot son: ascenso, descenso, y rotación sobre su eje en ambos sentidos.

El operario también puede enviar coordenadas concretas para el posicionamiento del robot. 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.

### 5.3.3 Captura de Datos e Imágenes

La interfaz gráfica recibirá imágenes de la cámara instalada en el robot, de esta forma el usuario podrá ver qué ocurre en la profundidad del pozo y actuar en consecuencia. La imagen se actualizará en tiempo real en la interfaz visual. Del mismo modo, la red de sensores propios del robot y los sensores de la aplicación enviarán información que se verá reflejada en la interfaz gráfica.

### 5.4. Comunicación TCP/IP

La comunicación entre los diferentes elementos de este sistema, se desarrolla bajo sockets haciendo uso de la clase CSocket de Windows. En la Figura 13 se muestra un diagrama de bloques de la conexión.

La información que la interfaz ha de enviar es:

- Velocidad y sentido de giro de 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.

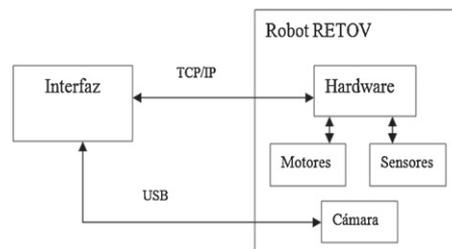


Figura 13: Conexión entre la interfaz y el robot.

En la Figura 13 se puede observar que la conexión entre la cámara y la interfaz visual es a través del cable USB. Este tipo de comunicación resulta adecuada para el prototipo de laboratorio que se desplaza sobre una tubería de 2 metros de longitud. Sin embargo, para la versión definitiva se contempla el uso de fibra óptica como alternativa tecnológica dada la longitud real de desplazamiento del robot (1.5 Kilómetros promedio)

## 6. Resultados

La estructura diseñada puede desplazarse por la tubería vertical y su diseño basado en tensegrity 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 1 metro para poder calcular la velocidad alcanzada por el robot.

Tabla 4: Ensayo realizado sin carga

|          | Tiempo      | Velocidad    |
|----------|-------------|--------------|
| Ascenso  | 1 minuto    | 0.167(m/seg) |
| Descenso | 0.98 minuto | 0.163(m/seg) |

En la Figura 14 se presenta una secuencia fotográfica tomada durante las pruebas de ascenso y descenso del robot.

Adicionalmente, se realizó una prueba agregando al robot una carga de 500 gramos. En la Tabla 5 se resumen 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 incrementa en 48 segundos, mientras que en descenso se incrementa en 17 segundos como era de esperarse ya que para el ascenso el peso de la carga disminuye la velocidad del mismo.

Tabla 5: Ensayo realizado con una carga de 500 gramos

|          | Tiempo      | Velocidad      |
|----------|-------------|----------------|
| Ascenso  | 1.48 minuto | 0.0926 (m/seg) |
| Descenso | 1.15 minuto | 1.133(m/seg)   |

## 7. Conclusiones

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 la 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 una estructura pretensada tipo 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.

Los ensayos realizados con la estructura diseñada permiten validar el uso de un robot para esta aplicación. 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.

Esta estructura propuesta permite sensar las variables en el pozo en el caso de que los sensores fijos se dañen y automatiza la pesca de objetos que caen al pozo.

Actualmente los autores están trabajando en el segundo prototipo caracterizado por anillos que permitan superar obstáculos que pudiesen presentar por las soldaduras en la tubería y darle mayor flexibilidad a la estructura tensegrity.

#### ASCENSO

#### DESCENSO

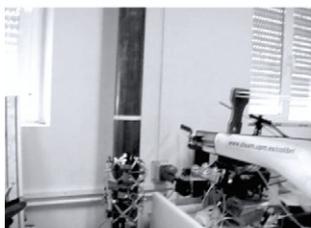
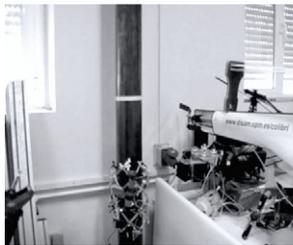


Figura 14: Secuencia de fotografías con los resultados con una carga de 500 gramos montada sobre el robot.

Además, en esta segunda versión, se desarrollará el hardware y software de control para darle más autonomía al robot. Para ello se integrarán sensores inerciales que junto con los encoders de los motores permitirán cerrar los lazos de control. Es importante destacar que la estructura de sensores externos al robot dependerá de las necesidades de medición en cada uno de los pozos. Dentro de las variables de interés a medir en el pozo se pueden mencionar: presión, temperatura, vibración, nivel, fisuras en la tubería, toma de muestras del crudo, viscosidad, etc.

En futuras versiones se estudiará la incorporación de WIFI con repetidoras y antenas que permitirá la comunicación de la estructura para las distancias de 3 a 4 km requeridos de la aplicación

#### English Summary

##### Prestressed Structure for Robotics Robot Oil Pipeline.

#### Abstract

This paper presents the development of a robot based on the prestressed structure to carry out maintenance inspection on oil pipelines. This type of mechanical structure is characterized by low weight and high capacity of adaptation to different diameters. The application requires the device to move vertically and developed high-speed. Note that in such facilities with electric submersible pumps (ESP) and Progressive Cavity Pumps (BCP), both highly sensitive to adverse environmental conditions, therefore, the importance of this research is that the robot incorporates a specific sensor network to measure those variables that can interfere with the pumps normal operation. In addition, this robot can recover objects that could fall into the well during installation and maintenance activities, this process is currently manual.

This paper describes in detail the design hypothesis and the methodology used to develop the first prototype. Finally, we present the results of such development through which it has been able to validate the potential of the application. Copyright IFAC 2012

#### Keywords:

Pre-tensioned, Robot Vertical Piping, electrical Submersible Pumps, progressive cavity pump

#### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo económico al Ministerio de Ciencia e Innovación (DPI2009-08778), a la

Comunidad de Madrid (RoboCity 2030 II) y a la Universidad del Zulia y a BCP-VEN por la información suministrada.

## Referencias

- Aldrich JB., Skelton R., 2005. Time-energy optimal control of hyper-actuated mechanical systems with geometric path constraints... IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference. pp. 8257-8256.
- Aldrich JB., Skelton R., K. Kreutz-Delgad., 2003. Control Synthesis for a Class of Light and Agile Robotic Tensegrity Structures. American Control Conference Denver. Colorado. pp. 5245-5251.
- Baghani A., Ahmadabadi M., Harati A., 2005. Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot (UT-PCR). IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2099-2104.
- Baker A., 2005. Analysis of Three degree of Freedom 6x6 Tensegrity platform, CIMAR, Tesis.
- Bayat J., Crane III C., 2006. Closed-Form Equilibrium Analysis of Planar Tensegrity Mechanisms, Florida Conference on Recent Advances in Robotics. FCRAR, volumen 2, pp.31-37.
- Bayat J., Crane III C. 2007. Kinematic Analysis of a Planar Tensegrity Mechanism, Florida Conference on Recent Advances in Robotics. FCRAR.
- Bram J., Skelton R.. 2001. Input/output selection for planar tensegrity models. IEEE Conference on Decision and Control Orlando, Florida USA. pp. 4280-4285.
- Burkhardt R., 2008. A Practical Guide to Tensegrity Design. Cambridge USA.
- Chandana P., Francisco J. Valero-Cuevas, Hod Lipso, 2006. Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion. IEEE Transactions on Robotics. VOL. 22. NO. 5. pp 944-957.
- Choi H., Roh S., 2005. In pipe Robot with Active Steering Capability for moving Inside of Pipelines. Bioinspiration Robotics: Walking and Climbing Robots, pp. 375-393.
- Connelly. R 2009. Tensegrities and Global Rigidity. Department of Mathematics. Cornell University Ithaca USA. pp. 1-29
- Hirschfeldt M., 2008. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas. OilProduction.net.
- Grand Ch., Bidaud, N., Jarrasse, 2006. Design of innovative unfoldable Wheel with contact surface adaptation mechanism for planetary rovers. III Proceeding of the ESA workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and automation. Astra p p.1-8.
- Grand Ch., Bidaud Ph., Jarrasse N., 2007. Innovative concept of unfoldable Wheel. World Congress. Besant . pp. 18-21.
- Fuller R., Tensile-Integrity Structures U.S. Patent 3,063,521.1962.
- Schenk M., Herder J., Guest S., 2006. Design of statically Balanced Tensegrity Mechanism, ASME. International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Pennsylvania USA.
- Shai O., Tehori I., Bronfeld A., Slavutin M., Ben-Hanan U. 2009. Adjustable Tensegrity Robot based on Assur Graph Principle. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 13-19, Lake Buena Vista, Florida, USA, pp 1-5
- Shibata M., Saijyo F., Hirai S., 2009. Crawling by Body Deformation of Tensegrity Structure Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe, Japan. pp. 4375-4380.
- Ocaña L., 2008. Análisis de Técnicas y equipos de pesca usados con mayor frecuencia en la perforación de pozos de Petróleo. Tesis de grado Facultad de Ciencias de la Ingeniería Quito ecuador, pp.146
- Urdaneta M. y Saltaren, R. (2008). Estudio del Sistema de tracción de una estructura robótica para tuberías en Sistemas de Extracción Petrolera con BES y BCP. XXIX Jornadas CEA. Septiembre 2008.
- Valentín Gómez Jauregui. (2007). Tensegridad: Estructuras Tensegricas en Ciencia y Arte. Universidad Cantabria, Santander, p.p. 103.
- Vásquez. R.E. (2000). Sistemas tenségricos. Medellín: Escuela de Ingeniería Estructuras. Stockholm.
- Vásquez R., Correa J., 2005. Sistemas Tenségricos: Alternativas para la robótica. IEEE Colombia Workshop on Robotics and Automation ICRA.
- Weimin Shen, Jason Gu and Yanjun Shen. (2005). Proposed Wall Climbing Robot with Permanent Magnetic Tracks for Inspecting Oil Tanks. IEEE International Conference on Mechatronic and Automation, July 2005, p. 2072-2077.
- Xingru Wang, Zhengyao Yi, Yongjun Gong and Zuwen Wang. (2009). Optimum Dynamic Modeling of Wall Climbing Robot for Ship Rust Removal. ICIRA, pp. 623-631.
- Xu F., Wang. 2008. Design and Experiments on a New Wheel-Based Cable Climbing Robot. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. pp 418-422.
- Xu, F., Wang X., y Xie, Q., 2008. Obstacle Crossing Ability of a New Wheel-Based Cable Climbing Robot. 15 th International conferences on Mechatronics and Machine Vision in Practice. pp.545-549.
- Young-Sik Kwon, Eui-Jung, Lim H , Byung-Ju Yi. 2007. Design of A reconfigurable Indoor Pipeline Inspection Robot. International conference on Control, Automation and Systems. pp. 712-716.

## Apéndice A. 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"(139.7(mm)) | 50.8(mm)  |
| 3-1/2"(88,9(mm))  | 7"(139.7(mm))     | 88.9(mm)  |
| 4-1/2"(114,3(mm)) | 9-5/8"(244.4(mm)) | 130.1(mm) |
| 5-1/2"(139,3(mm)) | 9-5/8"(244.4(mm)) | 105.1(mm) |

## Apéndice A. Tabla con los coeficientes de rozamiento estático y cinético.

| Superficies de contacto              | $\mu_e$  | $\mu_d$ |
|--------------------------------------|----------|---------|
| Cobre sobre acero                    | 0.53     | 0.36    |
| Acero sobre acero                    | 0.74     | 0.57    |
| Aluminio sobre acero                 | 0.61     | 0.47    |
| Caucho sobre concreto                | 1.0      | 0.8     |
| Madera sobre Madera                  | 0.25-0.5 | 0.2     |
| Madera encerada sobre nieve húmeda   | 0.14     | 0.1     |
| Teflón sobre teflón                  | 0.04     | 0.04    |
| Articulaciones sinoviales en humanos | 0.01     | 0.03    |

Fuente: Serway R. A. Física. Editorial McGraw-Hill. (1992)