

---

---

## Diseño y fabricación de un mecanismo para la inspección interna de tuberías

Javier Díaz Estrada<sup>1</sup>, Manuel Nandayapa<sup>1</sup>, Osslan Osiris Vergara Villegas<sup>1</sup>, Ángel Flores Abad<sup>1</sup>,  
Ulises I. Ponce<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

### Resumen

El presente proyecto trata sobre el desarrollo de un mecanismo que nos auxilie en transporte de una cámara para la inspección interna de una estructura tubular. El diseño mecánico presentado asegura mantener una cámara de video al centro de una tubería. Por lo tanto, la estructura mecánica fabricada en aluminio presenta tres soportes en arreglos circular separados 120 grados entre ellos. El diseño se validó obteniendo un video de un anillo laser en el interior de la tubería.

**Palabras clave:** Diseño mecánico, tuberías.

### Introducción

Antecedentes del diseño mecánico

Las máquinas y los mecanismos fueron ideados desde el amanecer de la historia. Los antiguos egipcios, aunque no conocían la rueda y polea, conocían el plano inclinado, la palanca y el rodador de troncos; y con ellos construyeron pirámides y monumentos. La primera aparición de la rueda y la polea de eje ocurrieron en Mesopotamia alrededor del 3mil y 4mil a.C.

Mucho del diseño primitivo estuvo dirigido hacia aplicaciones militares como catapultas, aparatos para escalar, entre otros. Más adelante fue acuñado el término ingeniero civil para diferenciarlo del militar. La ingeniería mecánica tuvo sus principios en el

diseño de máquinas, a medida que las invenciones de la Revolución Industrial requerían soluciones más complicadas en problemas de control de movimiento [1].

Mecanismos de Limpieza e Inspección de Tuberías

En nuestros tiempos existen 3,5 millones de líneas en tuberías alrededor del mundo. Este sistema ha provisto un medio confiable para la transportación de hidrocarburos por 100 años. Una gran cantidad de ese sistema de líneas ha alcanzado, o pronto lo hará, el fin de su vida útil para el cual fue diseñado. Muchas de las líneas operan en ambientes hostiles, transportando productos corrosivos, y como resultado sufren el mismo tipo de daño. Se

estima que aún restan de 40 a 60 años en reservas de petróleo y gas, consecuentemente mucha de la aún existente infraestructura seguirá operando durante los años venideros. Es necesario por tanto la inspección y rehabilitación para asegurar una operación continua, segura y confiable [9].

Sin embargo, la corrida de los mecanismos de limpieza se está utilizando extensamente en el mundo hoy en día para limpiar tuberías en todas las industrias incluyendo las centrales eléctricas, la explotación minera, las refinerías, las plantas químicas y en las industrias petroquímicas. Con el paso de los años, el uso de estos mecanismos se ha convertido en un método bastante sofisticado en la limpieza de tuberías. Ya que estos fueron desarrollados para eliminar depósitos que pueden obstruir o retardar el flujo a través de una tubería. Actualmente estos mecanismos se usan durante todas las fases en la vida de un sistema de tuberías [10].

En 1963 el departamento de investigación de la compañía Shell ideó el uso de un

mecanismo de inspección (Tuboscope) basado en el método de flujo magnético (MFL) a partir de diferentes mecanismos para la inspección de tuberías han sido utilizados [12]:

1964: Sistema comercial de inspección MFL, solo inspeccionaba una cuarta parte de la circunferencia.

1966: Primer sistema MFL para una circunferencia total

1978: Primer sistema MFL de alta resolución (British Gas)

1986: Primer sistema para corrosión en líneas con líquidos.

1992: Primer sistema ultrasónico para detectar grietas.

1997: Desarrollo de sistemas con capacidad de detección de daño mecánico

2005: Desarrollo de sistemas con capacidad de medir el espesor de la pared del tubo y detectan grietas

## Metodología

En la figura 1 se observa el diagrama de flujo del proceso que sigue este documento, donde los cuadros con esquinas rectas describen la actividad a realizar, por ejemplo, definir el problema, aclara que es un paso primordial que dará la pauta de este proyecto, ya que se suple la necesidad que existe, en el cuadro redondeado siguiente menciona el conocer el

básico funcionamiento, esta tarea da como sobre entendido que no solamente se busca hacer un prototipo, sino que saber por qué.

En el siguiente cuadro donde se analiza la necesidad que busca este proyecto suplir, el análisis que se genera es a partir de toda la información requerida para comprender a

cabalidad la necesidad y así saber con qué se cuenta para la complementación de este mecanismo.

Se genera un diagrama de lluvia de ideas como se menciona en el tercer cuadro redondeado. Y como última actividad resaltada en el diagrama es proponer soluciones, ya que se tiene la información necesaria y ya se tiene en cuenta la materia disponible para la fabricación del mecanismo.

En el cuadro primer diseño prototipo, se propone hacer un modelado en software para poder manipular las medidas y así tomar las decisiones pertinentes para que el mecanismo ya fabricado sea óptimo para el propósito de este documento.

Luego en comprobar el funcionamiento del mecanismo, en el que se busca que pueda ser introducido a una estructura tubular. Se busca documentar todo este proyecto y entregar la documentación pertinente así mismo el prototipo del mecanismo.

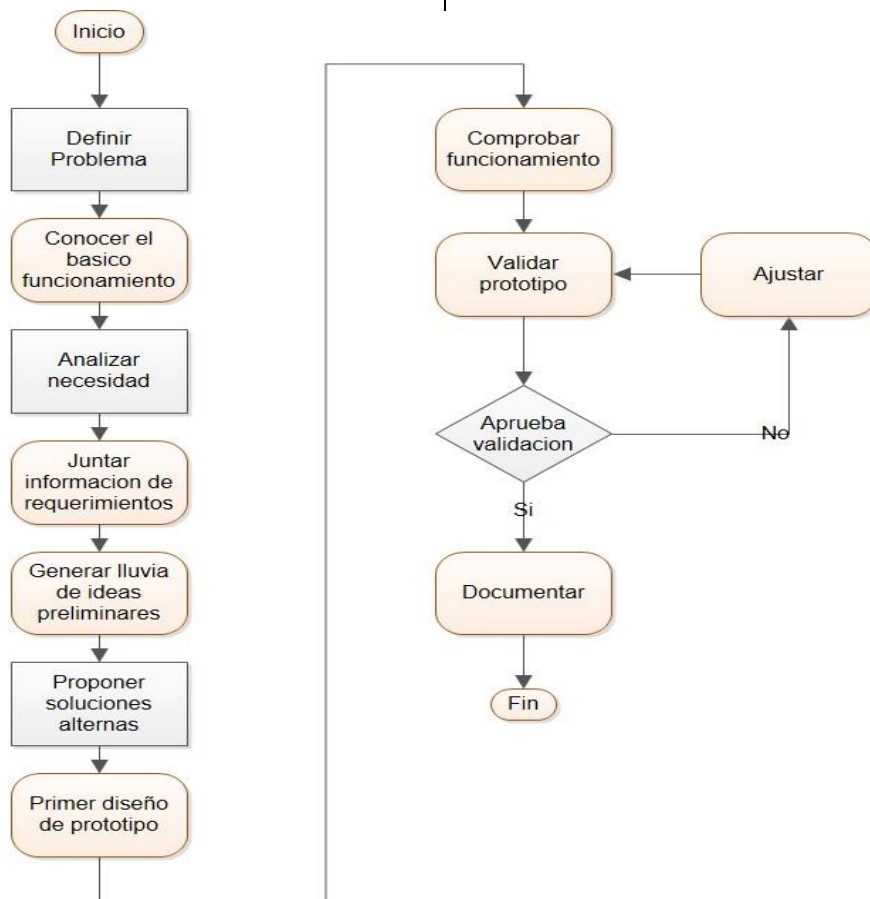


Figura 1: Diagrama de flujo, tareas a ejecutar en el proceso de todo este proyecto

## Definir el problema

La definición del problema es el primero y más importante de los pasos de todo el proceso de investigación. Definir el problema nos permite conocer y delimitar el terreno de lo desconocido. Su planteamiento adecuado no sólo implica considerar la situación problemática, es necesario también atisbar las posibles vías de solución [2]. El problema se ha definido en tener, diseñar y fabricar un mecanismo que mantenga una cámara concéntrica a la superficie interna de la tubería.

## Conocer el Básico Funcionamiento

Cuando se comprende el fundamento, y la meta se establece claramente, se está listo para formular un conjunto de especificaciones de funcionamiento, las especificaciones de funcionamiento definen lo que el sistema debe de hacer, en tanto las especificaciones de diseño definen como debe de hacerse dentro de las especificaciones de funcionamiento que se identifican es que debe de mover una cámara a través del interior de una estructura tubular.

## Analizar la Necesidad

La necesidad es de un mecanismo que nos permita mover la cámara dentro de la estructura tubular.

## Información de Requerimientos

Los requerimientos son declaraciones que identifican atributos, capacidades, características y/o cualidades que necesita cumplir un producto para que tenga utilidad.

Los requerimientos con los que debe de cumplir el mecanismo son:

Que sea capaz de transportar la cámara dentro de la estructura.

Que sea capaz de mantener centrada la cámara con respecto al área transversal

Que se ajuste a diferentes diámetros

Que permita tener una lámpara auxiliar a la cámara

## Lluvia de Ideas

El objetivo de este paso es generar un gran número de ideas sin prestar atención, por el momento, a la calidad. Cuando se realiza apropiadamente esta técnica puede resultar fructífera y algunas veces termina en un “torrente frenético” de ideas que se aglomeran y se apoyan entre sí [2].

Aplicando esta técnica se pudo realizar un diagrama de lluvia de ideas en las que se pudo analizar el material con el que se realizará el prototipo del mecanismo, en la figura 2 se muestra este diagrama.

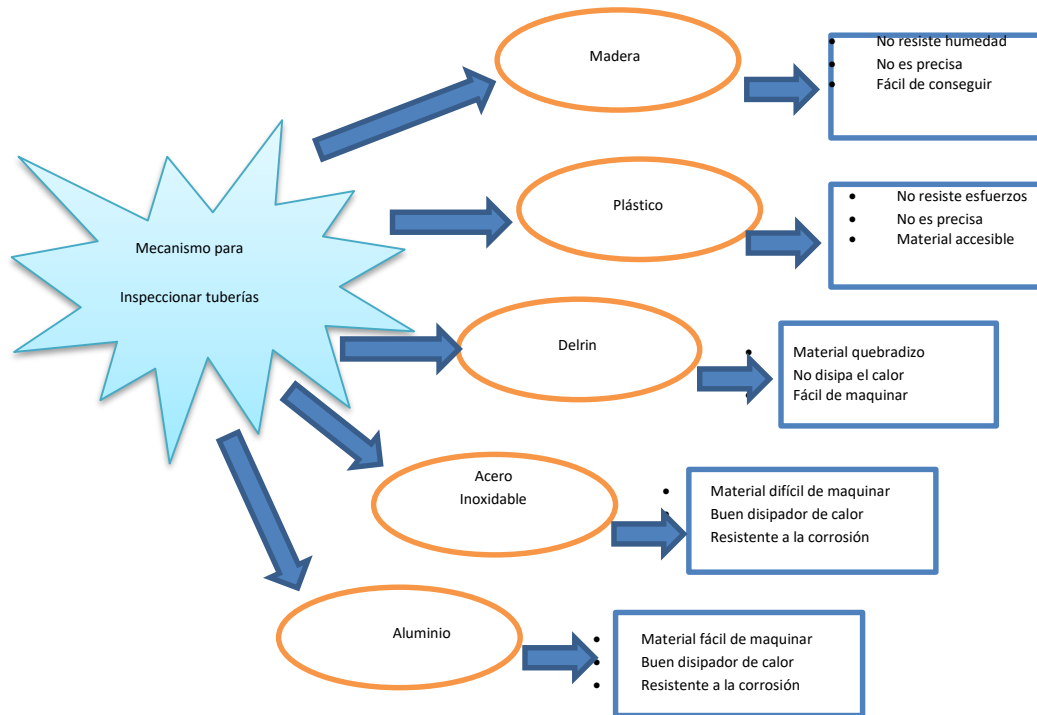


Figura 2: Diagrama de Lluvia de Ideas

### Proponer Soluciones

Se propuso la fabricación de un mecanismo fabricado en combinación de diferentes materiales los cuales darían fuerza y flexibilidad así mismo resistencia a la corrosión, algunas partes serían fabricadas en aluminio, algunas otras en acero inoxidable y unas más en delrin, y para la inspección de

parte interna de la estructura se optó por el uso de una cámara alámbrica (LifeCam Studio modelo 1425) la cual se podrá conectar a una computadora por medio de un puerto USB, así mismo se agregó una lámpara circular (Angel eye 50mm) como auxiliar para la cámara, la lámpara será alimentada por medio de una batería de 12 volts

### Resultados

Si el sistema mecánico que se trata de diseñar es de cierto compromiso, el desconocimiento de la seguridad real que el método de cálculo utilizado sistemas que simulen las condiciones reales de funcionamiento. Estos

ensayos determinan modificaciones en el diseño inicial tanto más profundas y costosas cuanto menos racionalmente haya sido realizado el diseño. El proceso se prolonga con sucesivas modificaciones y ensayos tanto

más numerosos cuanto más a ciegas, y por tanto con menos acierto, se realizan dichas modificaciones. La aparición de las computadoras y el avance de los métodos teóricos de análisis, han venido a modificar substancialmente esta situación. En la actualidad, es posible prever las características y el comportamiento dinámico de un sistema con gran precisión, a pesar de la enorme complejidad de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema dinámico. Aunque dichas ecuaciones se conocen hace más de siglo y medio, sólo unos pocos casos muy sencillos y de limitada relevancia práctica han sido susceptibles de recibir solución analítica. Los métodos numéricos, utilizados conjuntamente con las computadoras, han permitido obtener - con más o menos esfuerzo - soluciones a todo tipo de problemas.

El diseño propuesto se basó en el método utilizado para el mecanismo MRINSPECT III, mostrado en la figura 3 el cual los aspectos que se consideraron fueron que la condición de que la rueda no se desliza sobre las superficies de tuberías, la fuerza de tracción es proporcional al coeficiente de fricción y la fuerza de presión entre la rueda y la superficie de la tubería, y el coeficiente de fricción depende del material de la rueda y

el estado de la superficie de las tuberías. Además, el mecanismo de acoplamiento del vehículo debe minimizar la variación de la fuerza de tracción causada por la variación de diámetros de tuberías. Por consiguiente, el mecanismo tiene que cumplir con los tres requisitos siguientes, deberá ser posible de empujar contra la pared de la tubería con fuerzas de presión adecuadas de tal manera que mantenga la cámara concéntrica a la tubería, la presión en la tubería no deberá mostrar un cambio significativo durante el traslado con el fin de proporcionar estabilidad durante la inspección, y por último el mecanismo deberá ser simple.

En la figura 3 se muestra el diagrama cinemático, el mecanismo un sistema con una base deslizable que permite el movimiento de los puntos de apoyo, donde " $l$ " es la longitud del eslabón que pivotea respecto a la base, " $K$ " es la constante de fuerza del resorte, " $h$ " representa la distancia del centro de la rueda a la base. " $F_w$ " denota la fuerza que se ejerce en la pared de la tubería, " $A_x$ " y " $A_y$ " son las fuerzas que el resorte ejerce en la intersección, " $x$ " es el desplazamiento en la base [14]. En el mecanismo propuesto la dimensión " $h$ " aumenta o disminuye según la dimensión del ángulo  $\theta$ , y la relación de " $h$ " y " $x$ " se obtiene como

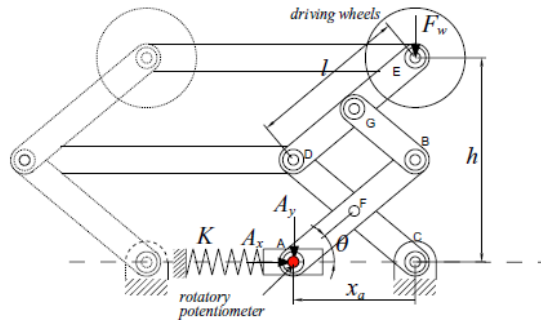


Figura 3: Mecanismo MRINSPECT III

En el mecanismo propuesto la dimensión “ $h$ ” aumenta o disminuye según la dimensión del ángulo  $\theta$ , y la relación de “ $h$ ” y “ $x$ ” se obtiene como

$$h = 2x \tan \theta = 2\sqrt{l^2 - x^2} \quad (1)$$

La fuerza radial  $A_x$  y  $A_y$  actúan en el resorte y se escriben como:

$$A_x = 2F_w \tan \theta, \quad A_y = 0 \quad (2)$$

Usando las ecuaciones (1) y (2), la Ecuación (3) se derivaría:

$$A_x = \frac{2F_w x}{\sqrt{l^2 - x^2}} = 4F_w = \frac{l^2 - h^2/4}{h} \quad (3)$$

Ahora diferenciamos ecuación (3) y derivemos la constante  $K$  y el punto de operación  $x_d$ .

$$A_x = K(x - x_0)' \quad (4)$$

Donde  $x_0$  indica el movimiento inicial. Entonces obtenemos:

$$K = \frac{2F_w}{\sqrt{l^2 - x^2} d} \frac{l^2}{l^2 - x^2} \quad (5)$$

$$x_0 = \frac{x^3 d}{l^2} \quad (6)$$

La ecuación (5) representa la constante del resorte y la ecuación (6) indica la longitud inicial del resorte. Ambas son ecuaciones necesarias para calcular la fuerza que es aplicada en la pared

#### Diseño Prototipo

Con el uso del software SolidWorks se desarrolló un modelo del prototipo (figura 4), el consta de una cámara, un soporte para un láser, llantas para facilitar su desplazamiento dentro de la estructura, resorte para crear una fuerza que permita que la cámara este centrada con respecto a la estructura.

En la figura 5 se muestra el sistema de muelle que se diseñó para el mecanismo.

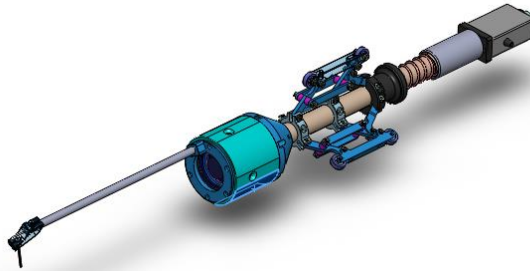


Figura 4: Prototipo de proyecto en SolidWorks

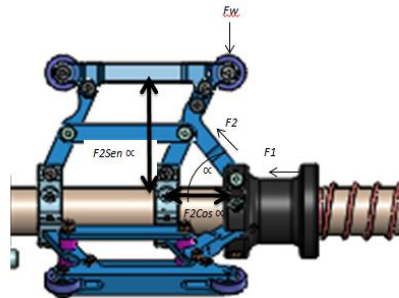


Figura 5: Mecanismo de muelle

Analizando la fuerza ejercida en el punto de contacto con la pared obtenemos

$$Fr^2 = (F1 + F2Cos \alpha)^2 + (F2Sen \alpha)^2 \quad (7)$$

Una vez realizada la ecuación y simplificando obtenemos

$$Fr = \sqrt{(F1^2 + F2^2 + 2F1F2Cos \alpha)} \quad (8)$$

Comprobar funcionamiento

Después de ensamblado el mecanismo fue probado en un ambiente de laboratorio en tubería de 4 y 6 pulgadas de diámetro, Se conectó la cámara a la computadora para observar la imagen interna de la estructura y se introdujo el mecanismo dentro de la misma

Se deslizó el mecanismo dentro de la estructura, y ya que el mecanismo cuenta con

un láser para poder identificar defectos dentro de la estructura, es viable que utilizando un software para captura de video y fotografía sea más fácil observar dentro de la misma como lo muestra la figura 6 en lado izquierdo con láser apagado y lado derecho con láser encendido

Ajustando las propiedades del software de la cámara se probó dentro de una estructura defectuosa para observar los cambios en la circunferencia hecha por la proyección del láser dentro de la estructura, la figura 6 muestra como la circunferencia del láser se deforma al momento de pasar por el defecto de la estructura, Con el uso de un software de programación para analizar las imágenes obtenidas se podría fabricar una imagen numérica de la tubería como lo muestra la figura 7.



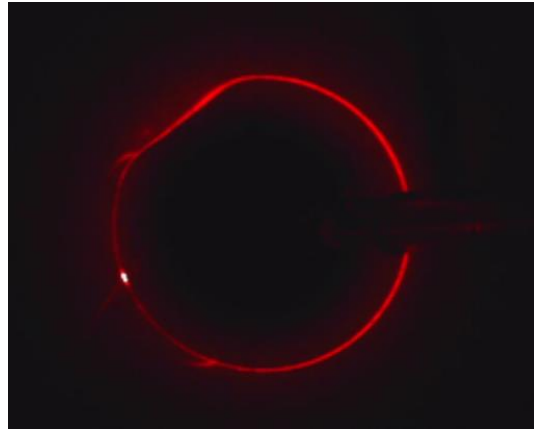


Figura 6: Inspección de tubería con defecto

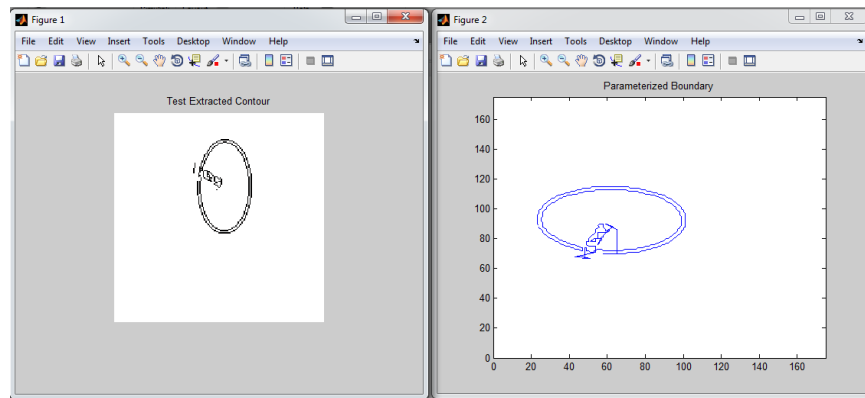


Figura 7: Imagen procesada utilizando MatLab

El mecanismo diseñado tiene como ventaja algunas características, entre las que se encuentran:

Capacidad para diámetros de 4 y 6 pulgadas

Cámara de alta resolución

Opción de captura de video o fotografía

Componentes a prueba de corrosión

Como áreas de oportunidad se puede observar lo siguiente:

Sistema alámbrico

Desplazamiento debe de ser manual

Solo funciona para sistemas rectos (no codos)

Entre los trabajos posteriores se recomienda adaptarle algún sistema de desplazamiento motorizado el cual pueda ser controlado remotamente, así mismo alguna fuente de

poder para dar mayor duración a la alimentación de la lámpara y laser, cambiar la cámara alámbrica por una inalámbrica de gran rango, y de esta manera se podría hacer

un escaneo y análisis de una longitud mayor de la tubería, diseñar un mecanismo que sea flexible para cubrir los codos.

## Referencias

[1] Diseño de Maquinaria, Robert L. Norton, Editorial McGraw Hill.

[2] Diseño en Ingeniería Mecánica, Joseph Edward Shigley & Charles R. Mischke, Editorial McGraw Hill.

[3] Cinemática de las Maquinas, Ing. Arturo Castillo Ramírez, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, enero 2005

[4] Análisis de Sistemas Mecánicos, Luciano Chiang S., Editorial Alfaomega

[5] Elementos de Maquinas, Departamento de Ingeniería Mecánica Energética y de Materiales, Universitas Navarrens

[6] Diseño y desarrollo de un Robot de Inspección de Tuberías, María Alejandra Urdaneta Lima, Madrid 2012

[7] How does Pipeline Pigging Work? RIGGZONE.com

[8] Smart Pig Technology, Information and Resources

[9] Diseño Mecánico de Diablo Ultrasónico Para la Medición de Espesores, Rubio González Carlos, Monterrubio López José Antonio, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, septiembre 2010

[10] Análisis de Integridad de Ductos, Cindy Monserrat Cortes Carrión, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

[11] Inspección y Mantenimiento de Líneas Submarinas, PEMEX, NRF-014-PEMEX-2001

[12] History of Intelligent Pigging, <http://osfm.fire.ca.gov/pipeline/pdf/conference/inlineinspection.pdf>

[13] [http://pipelinesinternational.com/news/the\\_origin\\_of\\_intelligent\\_pigs/65044](http://pipelinesinternational.com/news/the_origin_of_intelligent_pigs/65044).

[14] Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, Maki k. Habib