



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT NEUMÁTICO MÓVIL TELEOPERADO Y CON SEGURIDAD INTRÍNSECA PARA LA LOCALIZACIÓN DE DESPERFECTOS EN TUBERÍAS EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

Alfredo Puglesi ^{*1}, Leopoldo Sayanca y Susana Bernasconi

^{*1} Laboratorio de Control, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo
Centro Universitario (M5502JMA), Ciudad de Mendoza

apuglesi@uncu.edu.ar, leopoldosayanca@hotmail.com, sbernasc@uncu.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y resultados de un proyecto consistente en el diseño, construcción y puesta en marcha de un robot tipo gusano con el propósito de explorar tuberías de petróleo y/o sus derivados en el área de la refinación, en paros programados, sin carga pero con presencia de gases explosivos remanentes y con la finalidad de encontrar defectos, como rajaduras, obstáculos y fundamentalmente corrosión mediante inspección visual de alta definición.

Como metodología, este proyecto se dividió por partes, que desde una concepción integral, articuló mecánica (CAD /CAM), electricidad, neumática, automatización y supervisión mediante una interfaz hombre máquina (HMI).

Entre los elementos principales constituyentes se destacan: cilindros neumáticos, válvulas direccionales con mando por solenoides, cámara infrarroja con conexión USB a PC, misceláneos mecánicos incluyendo articulaciones, PLC y sistema HMI asociado.

La característica relevante es que los movimientos son accionado por cilindros neumáticos con la parte eléctrica residiendo en área segura, esto es, que la única señal eléctrica presente en el robot es la cámara infrarroja, contenida dentro de un fuelle, estanco y presurizado para evitar la entrada de gases. El desplazamiento puede ser horizontal y hasta vertical, girar hasta 30°, dentro de una tubería de 150 mm de diámetro como mínimo y hasta 25 metros de longitud. Estas especificaciones pueden ajustarse a requerimientos puntuales, que exijan diámetros y longitudes mayores.

En Sala de Control el sistema HMI se comunica con el PLC, poniendo en marcha el robot, hacerlo avanzar, retroceder, detenerlo, calcular on-line la distancia recorrida y determinar con precisión su ubicación. Las imágenes pueden observarse en el momento y registrarse para una inspección off-line.

Como conclusión, las pruebas han resultado muy satisfactorias, aunque como todo prototipo, es factible de dotarle de mayores y mejores prestaciones, siendo éste sólo un punto de partida.

Palabras Claves: robótica, inspección visual, mecatrónica, industria del petróleo, educación



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Continuando con lo expresado en el resumen, la justificación de este desarrollo se encuentra en los altos costos de alquiler de esta clase de dispositivo [1], siendo la idea central poner a disposición del medio esta realización y así contribuir al desarrollo local en este tipo de emprendimiento.

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

La inspección visual, sobre todo para la detección temprana de corrosión en el interior de tuberías empleadas en la industria del petróleo está comprendida específicamente en las conocidas prácticas de Ensayos No Destructivos (END), que por definición es la “Utilización de técnicas no invasivas para la determinación de la integridad de un material, componente o estructura” o “Medida cuantitativa de algunas características de un objeto sin dañarlo”, dentro de dichas técnicas está la inspección visual, contemplada en la normativa UNE-EN13018:2001. El robot construido se ajusta a los requerimientos de la inspección visual, dada la alta definición que proporciona la cámara infrarroja, en cuanto a corrosión se refiere, siendo también de ayuda en la detección y evaluación de grietas, detección de fugas, determinación de posiciones internas de interés y medidas de ocasionales deformaciones. Su objetivo principal es usarlo en tramos de tuberías entre plantas y equipos de refinerías, donde los ángulos de las mismas no son agudos, para evitar pérdidas de cargas, y tampoco de gran longitud.

A continuación, se describirán las diferentes etapas, tanto de diseño como constructivos, siendo relevantes los aspectos mecánicos, neumáticos, de control automático y HMI asociado.

3. PARTE MECANICA

El prototipo cuenta con cuatro cilindros neumáticos de simple efecto, para la sujeción en el interior de la tubería, un par en la parte delantera, otro par en la parte trasera y un cilindro neumático de doble efecto central o cuerpo para el desplazamiento longitudinal dentro de la misma. La cámara infrarroja se ubica en el extremo delantero.

Los vástagos de los cilindros neumáticos de simple efecto, utilizados para la sujeción, se encuentran roscados a las patas que presionan las paredes de la tubería y aseguran un correcto agarre. Como el robot debe ser capaz de realizar giros, se intercalan en la estructura dos articulaciones de goma flexibilizando el conjunto. Se debió tener en cuenta el conexionado, tanto neumático como la alimentación a la cámara y cable de señal de video. La Figura 1 muestra el robot terminado mecánicamente, con la alimentación neumática para los cilindros y sin el fuelle presurizado que envuelve a la cámara para una mejor apreciación del conjunto.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

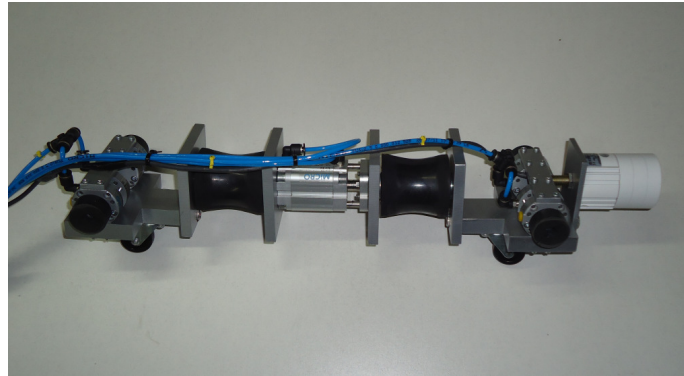


Figura 1 Robot gusano terminado

3.1 Desplazamiento del robot

El desplazamiento longitudinal del robot en el interior de la tubería se asemeja al movimiento de un gusano [2]. Para trasladarse, el prototipo realiza movimientos en una secuencia determinada: primero se introduce el robot en la tubería, apoyado en una par de ruedas “de giro libre o locas” ubicadas longitudinalmente en su parte inferior, permitiendo el centrado del conjunto en la misma, según lo ilustra la Figura 2.

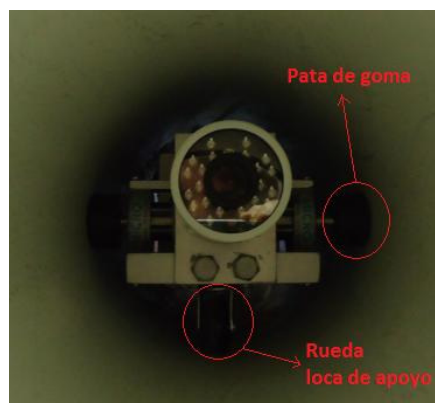


Figura 2 En primer plano la cámara, rueda loca y patas delanteras

Una vez en el interior, hay retracción de los vástagos de los cilindros de simple efecto de la parte delantera o lado cámara, separando las patas de la pared de la tubería, a su vez hay extensión de los vástagos de los cilindros de simple efecto de la parte trasera, fijando sendas patas a la mencionada pared. Así sujeto el robot por su parte posterior, el cilindro neumático central de doble efecto extiende su vástago y produce el avance del subconjunto delantero.

Luego se extienden los vástagos de los cilindros delanteros, apoyando sus patas a la pared y a se liberan las posteriores mediante la retracción de los vástagos del subconjunto trasero. Producido esto, el vástago del cilindro central se retrae, haciendo avanzar ahora a la parte posterior, hecho esto, se fijan nuevamente las patas traseras y la secuencia comienza de nuevo, lo que permite el avance a lo largo de la tubería. Para realizar el retroceso del conjunto, simplemente se debe invertir la secuencia. El avance o retroceso, está en función de la carrera del cilindro central que es de 25 mm.

3.2 Determinación de variables de interés

Se determinaron valores de las variables de interés, a saber:

3.2.1 Velocidades

Una vez construido el Robot, mediante la experimentación, se pudo obtener un valor promedio de las velocidades de avance y de retroceso tanto horizontal como vertical del conjunto en la tubería. Para ello, en primera instancia, se colocó la misma en forma horizontal, se introdujo el robot en su interior, y se realizó la secuencia de avance cuatro veces correspondiente a un desplazamiento de 100 mm y se tomó el tiempo empleado en realizar dicha secuencia tres veces, para así obtener un promedio, arrojando un promedio de $t = 24,21\text{ s}$ y por lo tanto una velocidad de avance igual a $v = x/t = 247,83\text{ mm/min}$.

Luego se hizo lo mismo para la secuencia de retroceso, considerándose también un desplazamiento de 100 mm , obteniéndose en promedio un $t = 23,43\text{ s}$ y una velocidad de retroceso de $v = 256,63\text{ mm/min}$, pudiéndose concluir que tanto la velocidad de avance como de retroceso, estando la tubería en posición horizontal, es en promedio, de aproximadamente $v = 250\text{ mm/min}$.

Realizando la misma serie de experiencias, pero colocando en esta ocasión la tubería en posición vertical, se obtuvo para el avance una velocidad de $v = 256,74\text{ mm/min}$ y una velocidad de retroceso de $v = 271,5\text{ mm/min}$, esto debido a que la fuerza de gravedad tiene la misma dirección del movimiento de desplazamiento, resultando una velocidad promedio es de $v = 264\text{ mm/min}$.

3.2.2 Fuerzas en juego

Utilizando una presión de 3 bar para el accionar de los cilindros, se analizó el accionar del cilindro neumático central, encargado de desplazar longitudinalmente el prototipo, considerando el área del émbolo del mismo que es de 25 mm , es capaz de entregar una fuerza teórica de $F_t = 147,26\text{ N}$. A su vez los cilindros neumáticos de simple efecto poseen un área de cilindro de 20 mm ; y realizan una fuerza teórica de $F_t = 94,25\text{ N}$. Como se sabe, la fuerza real que entregan los cilindros



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

neumáticos es menor debido a la fuerzas de rozamiento, pérdidas de carga y posibles fugas. Se estima un rendimiento entre el 80 % y el 90 %, por lo que tomando un rendimiento porcentual del 85 %, se obtiene que la fuerza real del cilindro neumático central de doble efecto que constituye el cuerpo es de $F_r = 125,17 N$ y por cada uno de los cilindros neumáticos de simple efecto que conforman las patas de $F_r = 80,11 N$.

3.2.3 Agarre a la pared de la tubería

Los vástagos de los cilindros neumáticos de simple efecto se encuentran unidos a patas de goma, que al salir, ejercen presión sobre las paredes de la tubería, y se logra efectuar el agarre.

A continuación se describen las fuerzas en juego calculadas que verificaron el correcto agarre, esto es, que el robot no patine cuando se acciona el cilindro neumático central que genera los desplazamientos longitudinales, tanto horizontal, vertical o en ángulos intermedios.

Se comenzó analizando el caso de un desplazamiento longitudinal horizontal; como se dijo la fuerza real que ejerce cada una de las patas es de $F_r = 80,11 N$, denominada también fuerza de pata o F_p . La Figura 3 corresponde a un gráfico de cuerpo libre, en el que se observa que las fuerzas actuantes sobre el punto de contacto entre una pata del robot y la pared de la tubería son la fuerza de pata F_p , la fuerza de tracción del cilindro central o F_{cil} , la fuerza de fricción F_f y la fuerza de reacción normal N .

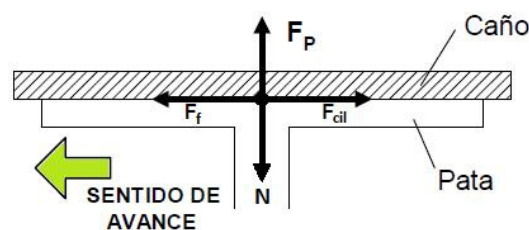


Figura 3 Gráfico de cuerpo libre para desplazamiento horizontal

Se busca el valor del coeficiente de rozamiento mínimo para que el robot no resbale al accionarse el cilindro neumático central de tracción. Como el estado buscado es el de equilibrio en el punto de contacto, la resultante de las fuerzas debe ser igual a 0.

En el eje "y" obtenemos:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma F_y = F_p - N$$

$$F_p - N = 0$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$F_p = N = 80,11 \text{ N}$$

Y en el eje "x":

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_x = F_f - F_{cil}$$

$$F_f - F_{cil} = 0$$

$$F_f = F_{cil}$$

La fuerza de rozamiento se modela mediante la fórmula:

$$F_f = \mu \cdot N$$

Donde μ es el coeficiente de rozamiento buscado, entre la pata de goma y la pared de la tubería de acero. Teniendo en cuenta que cada pata debe soportar solamente la mitad de la reacción de la fuerza del cilindro neumático central, de la ecuación anterior se desprende que:

$$F_{cil}/2 = \mu \cdot N$$

$$\mu = F_{cil}/2 \cdot 1/N$$

$$\mu = 125,17/2 \cdot 1/80,11$$

$$\mu = 0,78$$

(1)

Para que haya equilibrio estático se debe contar con un factor de rozamiento de valor igual o superior a la deducida en (1). Investigando posibles valores de factores de rozamiento, según tablas, se encontró que entre un acero y un material plástico como el caucho, el factor de rozamiento puede variar de 1 a 4. Luego de haber realizado pruebas dentro de la tubería, no se observó resbalamiento alguno, por lo que se concluye que el factor de rozamiento en este caso tiene por lo menos el valor mínimo buscado. En el caso de una traslación vertical en el interior de la tubería, se debe tener en cuenta la incidencia del peso del prototipo en la determinación del factor mínimo de rozamiento estático, la Figura 4 muestra las fuerzas en juego. En la cual observamos otra vez la fuerza que ejerce la pata sobre la superficie de la tubería y su reacción normal; como así también la fuerza de rozamiento, el peso y fuerza del cilindro central.

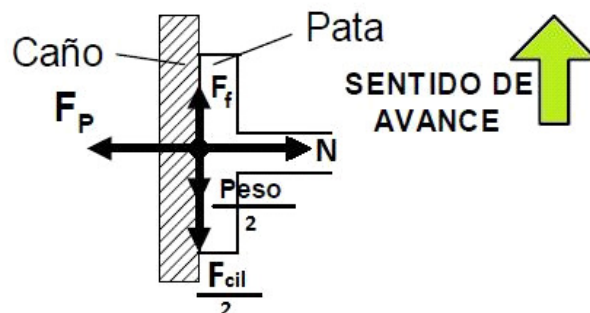


Figura 4 Diagrama de cuerpo libre para desplazamiento vertical



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Siguiendo igual procedimiento se encontró un $\mu = 1,15$, en este caso es necesario un coeficiente de rozamiento estático mayor al anterior para que no ocurra un desplazamiento de las patas durante el traslado vertical del robot, otra vez esta condición fue verificada mediante el ensayo.

3.3 Diseño y mecanizado

El diseño de todas las piezas que constituyen el robot se realizó con el software CATIA® de Dassault Systèmes™. Las piezas diseñadas tuvieron su punto de partida en la disposición adecuada de los cilindros y las distancias mínimas para intercalar las articulaciones, las Figuras 5,6 y 7 en 3D son demostrativas de esta etapa.

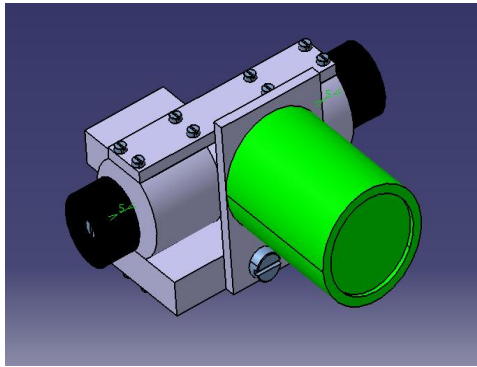


Figura 5 Parte delantera

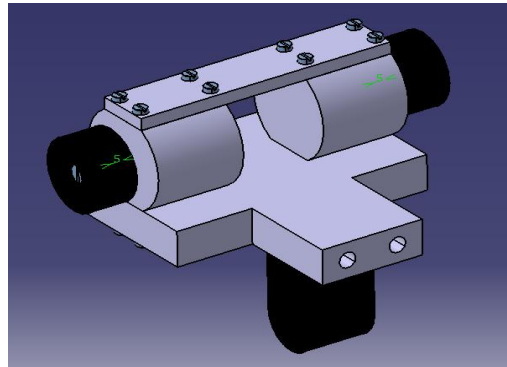


Figura 6 Parte trasera

Una vez terminado el diseño de todas las piezas, se prosiguió a la puesta en planos de las mismas. Utilizando también el software de diseño mecánico CATIA®, se pudieron realizar todos los planos, colocando las cotas correspondientes, y realizando vistas de cortes toda vez que fue necesario, dibujando rótulos, etc. Todos los planos cumplen con las normas utilizadas en el diseño mecánico, uno de ellos se muestra mediante la Figura 8.

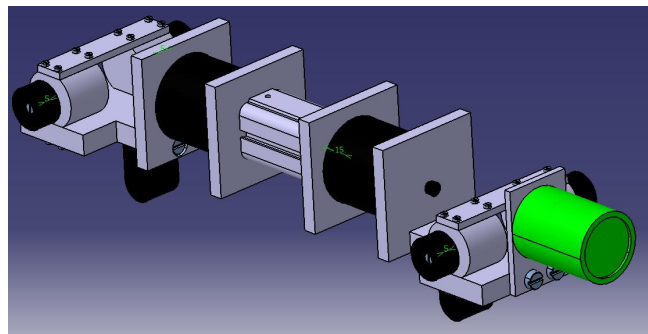


Figura 7 El modelo terminado



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERIA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

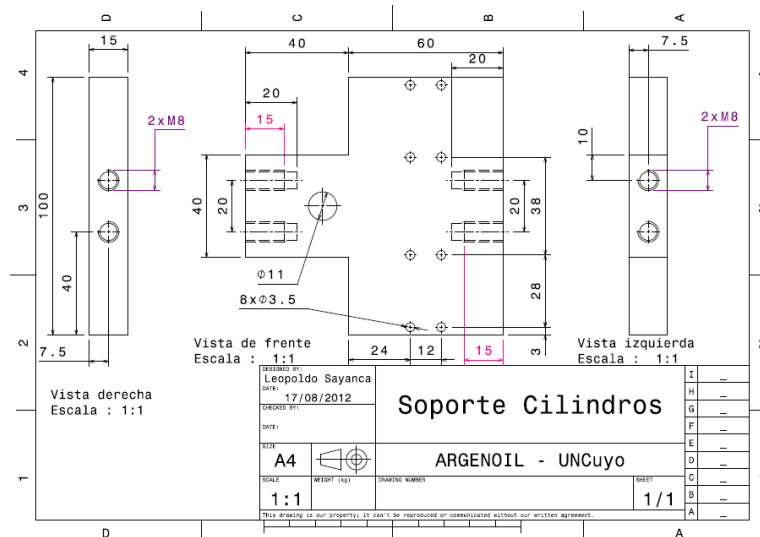


Figura 8 Plano generado mediante el software de CAD

El mecanizado se realizó en las instalaciones de la firma Argenoil SRL, quién tuvo la gentileza de facilitar sus máquinas herramientas y asesoramiento en el uso de las mismas. Dado el presupuesto, el factor que primó en la elección de materiales fue el económico, para todas las partes metálicas se utilizó acero SAE 1045, para las patas se usó caucho sintético tipo NBR (acrilonitrilo butadieno) y para las articulaciones se utilizó caucho natural. El armado final y las pruebas preliminares se realizaron en el Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo. En la Figura 9 se exponen todas las partes constitutivas principales del robot.



Figura 9 Piezas mecanizadas y elementos principales



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERIA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4. PARTE NEUMÁTICA Y ELECTRICA

Como se anticipara, el único elemento eléctrico presente en el robot es la cámara infrarroja, que para permitir su uso en áreas clasificadas eléctricamente como explosivas se usó un fuelle de caucho convenientemente presurizado que la envuelve, lográndose la estanqueidad necesaria. Del lado considerado como seguro se encuentra un gabinete estanco y dentro del mismo se hallan el autómata o PLC, las válvulas direccionales, la fuente y el filtro regulador de aire. El purgado de las válvulas se realiza en el interior del gabinete, presurizándolo y evitando así la posible entrada de gases explosivos. La Figura 10 muestra la disposición interna.



Figura 10 Interior del gabinete estanco

Se utilizaron dos válvulas direccionales, de cinco vías, dos posiciones, monoestables y mando por solenoide de 24 Vcc – 1 W, una para comandar los cuatro cilindros de simple efecto de las patas y otra para comandar el cilindro de doble efecto del cuerpo. La Figura 11 corresponde al esquema neumático.

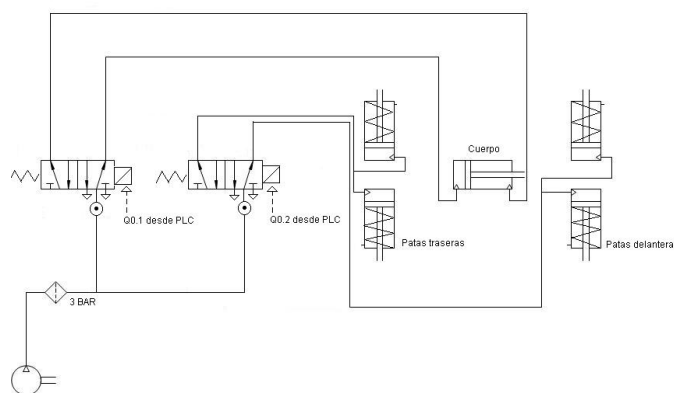


Figura 11 Válvulas direccionales y cilindros de patas y cuerpo

5. SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

Para automatizar el robot se utilizó un controlador lógico programable ó PLC de 12 entradas y 8 salidas discretas, con comunicación RS-485, obedeció esta elección la seguridad operativa, robustez, confiabilidad y alta inmunidad a las interferencias presentes en la industria. La programación se realizó en Grafcet (GRAFica de Control por Etapas y Transiciones), dada la naturaleza secuencial de los movimientos previstos para el robot.

El PLC se conectó al puerto serie de una PC, ubicada en Sala de Control, mediante un convertidor RS-485 a RS-232C y protocolo MODBUS[®], en dicha PC se realizó una interfaz hombre máquina (HMI) para supervisar el PLC que comanda el robot y cuya principal función es brindar al operador una ventana interactiva para que pueda arrancar o detener el robot mediante dos pulsadores distintos, hacerlo avanzar o retroceder y conocer la distancia recorrida, y por lo tanto, la posición dentro de la tubería, la Figura 12, muestra la pantalla principal de operación.

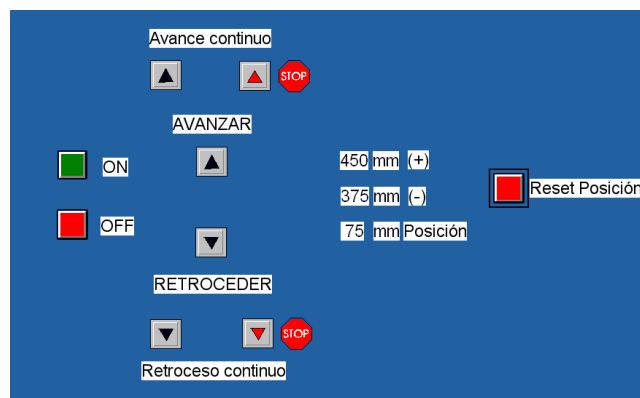


Figura 12 Pantalla de operación

A su vez, otra PC, corriendo el programa Debut Video Capture Professional[®], permitió observar el interior de la tubería en línea y con alta definición, a la vez que registraba todo el recorrido a fin posibilitar la migración de los archivos históricos a otras plataformas para análisis off-line.

6. CONCLUSIONES

Las pruebas fueron satisfactorias, se pudo corroborar un buen funcionamiento, tanto mecánico, electro neumático, del desempeño del autómatas programable o PLC, como de la interfaz HMI en la PC de monitoreo y también la inspección visual en la PC dedicada a esos efectos.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

La velocidad de desplazamiento no es muy alta, pero como el objetivo es realizar una inspección visual, no es un impedimento. En cuanto al material escogido, se realizó un compromiso entre el precio y el peso. El prototipo puede avanzar y retroceder, tanto en posición horizontal como vertical de la tubería sin deslizamientos no deseados.

Quedan como trabajos futuros la implementación de técnicas de visión artificial, que por sí brinden información procesada y como primer diagnóstico, del estado de la tubería. Se podrían incorporar sensores/transmisores de corrosión por ultrasonido u otro principio y finalmente y dependiendo de la aplicación, se le pueden agregar herramientas para extracción y recolección de muestras.

7. REFERENCIAS

- [1] Espinoza Velásquez M.E., Diseño y construcción de un robot móvil teleoperado para la localización de obstáculos en tuberías, Proyecto de grado, Facultad de Ingeniería Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador, 2005
- [2] Di Matteo L.M. y otros, Robot para exploración de tuberías de diseño compacto, modular, estanco y de seguridad intrínseca, Grupo de Inteligencia Artificial de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires, Buenos Aires, 2004.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la SeCTyP de la UNCuyo por el subsidio otorgado a éste Proyecto y a la Empresa Argenoil SRL que puso a disposición del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo sus instalaciones, en especial las máquinas herramientas y el asesoramiento por parte de su personal para el adecuado uso de las mismas.