

Diseño y Elaboración de las Tecnologías de Inspección Basadas en Herramientas de Limpieza para el Registro y Análisis de los Parámetros de Operación en Líneas de Transporte de Hidrocarburos

Mario Alberto Quintero

Ing. Electrónico, Universidad Industrial de Santander
Investigador, Corporación para la Investigación
de la Corrosión CIC
Bucaramanga, Colombia
mquintero@corrosion.uis.edu.co

Hernán Alfonso Garnica

M.Sc.(c) en Física, Universidad Industrial de Santander,
Corporación para la Investigación de la Corrosión CIC,
Investigador Grupo FITEK,
Universidad Industrial de Santander UIS
Bucaramanga, Colombia
hgarnica@corrosion.uis.edu.co

Humberto Zambrano Medina

Ing. Electrónico, Universidad Industrial de Santander,
Investigador, Corporación para la Investigación
de la Corrosión CIC
Bucaramanga, Colombia
hzambrano@corrosion.uis.edu.co

Ely Danner V. Niño

MSc en Física, Universidad Industrial de Santander
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo GINTEP,
Universidad Pontificia Bolivariana UPB,
Investigador Grupo FITEK,
Universidad Industrial de Santander UIS
Bucaramanga, Colombia
ely.valbuena@upb.edu.co

Sergio Quintero

Técnico Electromecánico,
Unidades Tecnológicas de Santander UTS, Técnico,
Corporación para la Investigación de la Corrosión CIC
Bucaramanga, Colombia
squintero@corrosion.uis.edu.co

Resumen— En este artículo se presenta el diseño y construcción de una herramienta inteligente (pig o marrano) que permite la medición de parámetros de operación de tuberías para transporte de hidrocarburos y que registra señales asociadas a su dinámica de movimiento dentro de la línea de transporte. El marrano está concebido para ser utilizado de modo regular por el operador, para aprovechar principalmente corridas rutinarias de limpieza. La herramienta recoge datos a bajo costo y el análisis de los mismos aporta al operador información valiosa sobre la evolución de la tubería, el grado de residuos, la presencia de posibles daños geométricos (defectos) e información sobre los parámetros operacionales. Esta información puede integrarse al plan de mantenimiento, lo cual permitirá una mejor toma de decisiones y ayudará a obtener un panorama de riesgos gracias al control de los cambios que experimenta la línea con el tiempo.

Palabras clave— Herramienta Inteligente, Inspección en Línea, Marrano de Líneas de Transporte.

Abstract— This article presents the design and construction of an intelligent tool (pig), which allows the measurement pipelines operation parameters for transportation of hydrocarbons and records signals associated with its dynamic movement within the transmission line. The pig is designed to be used on a regular basis

by the operator, drawing mainly runs routine cleaning. The tool collects data at low cost and analysis of the same operator brings to valuable information on developments in the pipeline, the degree of waste, the presence of potential damage geometry (defects) and information on operational parameters. This information can be integrated into the maintenance plan, which will enable better decision making and help to get an overview of risk control thanks to the changes in the line over time.

Keywords— Tool Smart, Inline Inspection, Pigging.

I. INTRODUCCIÓN

Las empresas transportadoras de hidrocarburos tienen como prioridad asegurar la correcta operación de las líneas de transporte. Con este fin implementan rigurosos programas de diagnóstico y mantenimiento que les permite identificar, controlar y mitigar las principales amenazas a la integridad de la infraestructura, entre las cuales se encuentra la amenaza por corrosión en líneas de transporte [1], [2]. En términos generales, las tecnologías de Inspección Inteligente son considera-

das las herramientas más eficaces para evaluar la integridad mecánica en las tuberías de transporte de hidrocarburos y son herramientas esenciales en la elaboración de los planes de mantenimiento y mitigación de la amenaza por corrosión [3]. En Colombia, hay aproximadamente 12 mil kilómetros de líneas que pueden ser inspeccionadas con herramientas inteligentes [4].

Las herramientas de inspección inteligente disponibles comercialmente y fabricadas exclusivamente por países industrializados representa para la industria local altos costos de inversión que dificulta el acceso a estas tecnologías y limitan la periodicidad en su uso. La Corporación para la Investigación de la Corrosión, a través de su interacción con la industria petrolera, ha identificado esta necesidad y propuso el desarrollo de una herramienta de diagnóstico general previo a una inspección especializada, que es utilizada en el país para evaluar la corrosión interna en la infraestructura petrolera.

En este trabajo se describe la construcción de una herramienta geométrica (marrano) que permite la medición de parámetros de operación y que registra señales asociadas a posibles anomalías geométricas dentro de la línea [5]. El marrano está concebido para ser utilizado de modo regular por el operador, al aprovechar principalmente corridas rutinarias de limpieza; se puede usar como herramienta semi-inteligente, herramienta de limpieza o herramienta geométrica; que permite, en sus diferentes configuraciones, reunir información valiosa sobre las tendencias de limpieza de las líneas en intervalos determinados de tiempo, la formación de depósitos de parafina, los riesgos de taponamiento de las tuberías, el avance y la eficiencia de la limpieza a lo largo de una secuencia de marraneo, los parámetros de operación y las condiciones de flujo [6]. La herramienta desarrollada juega un papel clave en el seguimiento de tendencias geométricas y operacionales como parte de los procesos de pre-inspección para evaluación de la viabilidad de un proceso de marraneo con tecnología más sofisticada como MFL o ultrasonido [7].

Esta información podrá integrarse en el plan de mantenimiento, lo cual permitirá la toma de decisiones y ayudará a obtener un panorama de riesgos gracias al control de los cambios que sufre la línea con el tiempo [8]. Por tal motivo, con esta herramienta los servicios prestados, a diferencia de lo que ocurre actualmente con el mercado de

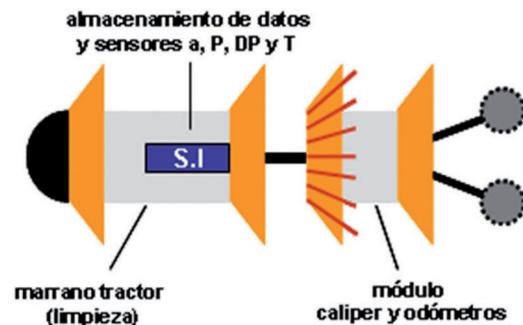
herramientas instrumentadas, no son de carácter puntual sino de seguimiento y control a través de los años.

II. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

A. Descripción de la herramienta

La herramienta es un dispositivo unidireccional constituido por un cuerpo, copas, discos, sensores de distancia (odómetros), sensores de presión diferencial, sensores de deformación (flexómetros) y sensores de temperatura. En la Fig. 1 se muestra un esquema general de la herramienta y en la Fig. 2 se presenta el diagrama virtual del diseño de la herramienta. En la Tabla 1 se muestra los parámetros más relevantes que se tuvieron en cuenta en el diseño de la herramienta, se consideró que el dispositivo soporta condiciones extremas al interior de la tubería, como altas presiones y temperaturas, cambios bruscos de temperatura, vibraciones, deformaciones de la línea, cambios de dirección por las curvas presentes en el trayecto, cambios de nivel, cambios de espesores, rotaciones y la agresividad del fluido transportado en la línea.

FIG. 1. ESQUEMA GENERAL DE LA HERRAMIENTA



Fuente: Los autores

FIG. 2. DIAGRAMA VIRTUAL DE LA HERRAMIENTA



Fuente: Los autores

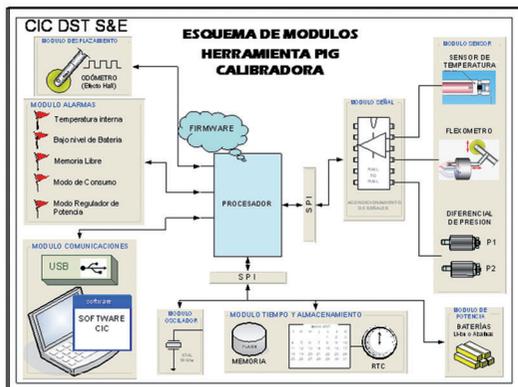
TABLA I
Parámetros generales de diseño

Parámetro	Detalle
Entorno	Líneas de transporte de hidrocarburos
Modo de Inspección	Por medio de raspadores de limpieza
Diámetro tuberías	>12 Pulgadas
Sensores	Presión Absoluta Presión Diferencial Temperatura del fluido
Tiempo de corrida	>4 horas
Presión de Operación	1200 psi
Presión Máxima de Operación	2500 psi
Presión de Diseño	3000 psi
Temperatura Máxima de Operación	65 oC

Fuente: Los autores

En la Fig. 3 se presentan los distintos módulos que constituyen el sistema electrónico de la herramienta inteligente. El módulo de control está basado en un microcontrolador que constituye el cerebro del sistema y administra los demás módulos. El módulo de acondicionamiento de señal se encarga de filtrar y digitalizar las señales análogas provenientes de los sensores, para su almacenamiento posterior en el módulo de memoria [9], [10]. Los datos almacenados son sincronizados con la fecha y hora entregada por el módulo de tiempo y con la información de distancia recorrida entregada por el módulo de posicionamiento (odómetro).

FIG. 3. ESQUEMA DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE LA HERRAMIENTA



Fuente: Los autores

B. Proceso de desarrollo de dispositivos, módulos y banco de pruebas

Inicialmente, se realizó la selección, el acondicionamiento y la validación de tecnologías, lo cual permitió conocer el desempeño de sensores de diferentes sensibilidades y rangos.

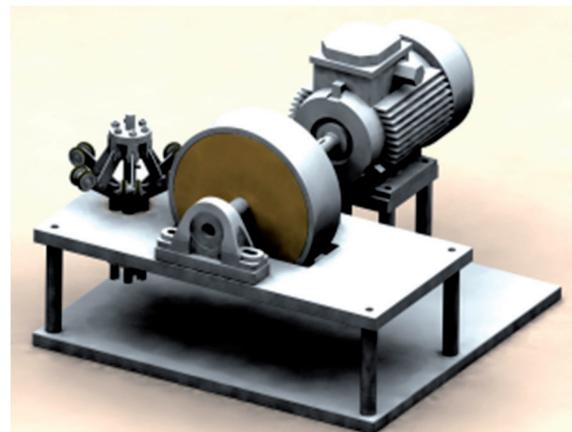
Se seleccionaron las tecnologías para el procesamiento digital de señales en tiempo real que permitieran implementar los filtros digitales, realizar la estadística y comprimir la información antes de guardarla en memoria.

La etapa de desempeño en laboratorio de la tecnología en desarrollo, se fundamenta en la creación de bancos de pruebas con defectos inducidos en diferentes configuraciones geométricas, como se muestran en Fig. 4. El banco de pruebas evalúa los arreglos de sensores y determina patrones de defectos que permiten modelar matemáticamente el fenómeno y estandarizar la identificación.

Esta etapa implicó la construcción del hardware electrónico para la adquisición y procesamiento de las señales entregadas por los sensores, el desarrollo del software embebido encargado de gestionar la herramienta prototipo y el análisis computacional que permitan caracterizar y graficar las señales entregadas por los sensores.

Se finaliza la construcción de los dispositivos prototipos con el estudio mecánico de las estructuras metálicas, tipo encapsulados, que permite articular y proteger la tecnología dentro de la herramienta de limpieza [11].

FIG. 4. BANCO DE PRUEBAS MODULOS MECÁNICOS



Fuente: Los autores

C. Sensores

La búsqueda y selección de tecnologías para medir las distintas variables de interés en la herramienta PIG se realizó siguiendo los parámetros de diseño mencionados anteriormente. Se debe recordar que para realizar un diagnóstico geométrico eficaz de la tubería, se requiere correlacionar la información de variables como presión, temperaturas, deformación distancia y diámetro, además de la comparación entre las mismas a través de una matriz. A continuación se describe el trabajo realizado en la selección de la tecnología correspondiente para cada variable a evaluar y se discuten los detalles más relevantes en selección e implementación.

1) Sensores de presión

Los factores más importantes considerados en la selección del sensor de presión se muestran en la Tabla 2. Para las condiciones de trabajo requeridas, se seleccionó un transductor de presión basado en principios piezoeléctricos que le confiere una alta resolución y mayor estabilidad al transcurrir el tiempo.

TABLA II
Parámetros de operación para la presión

Características de Operación	Valor
Rango de presión	Hasta 2000 psi
Precisión	+/- 0.5% de la Escala
Condiciones de trabajo	Buena tolerancia a ambientes corrosivos
Disponibilidad	Alta y de fácil adquisición en el mercado.
Acondicionamiento de señal	Modular, preferiblemente encapsulado.
Sensibilidad	0.5 a 1 psi.

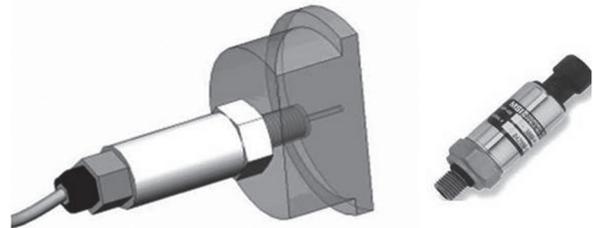
Fuente: Los autores

2) Sensores de temperatura

Dadas las condiciones de trabajo, se seleccionó para la aplicación un sensor de temperatura tipo semiconductor. Este sensor tiene muy buenas características relacionadas con

la robustez, tamaño reducido, alta precisión, acondicionamiento de señal simplificado y bajo costo. En la Fig. 5 se muestra el modo de instalación del sensor dentro de la cápsula mecánica con el fin de mantenerlo protegido de la corrosión y de las altas presiones.

FIG. 5. SENSORES ENCAPSULADOS Y EMPOTRADOS



Fuente: Los autores

3) Sensores Odómetros

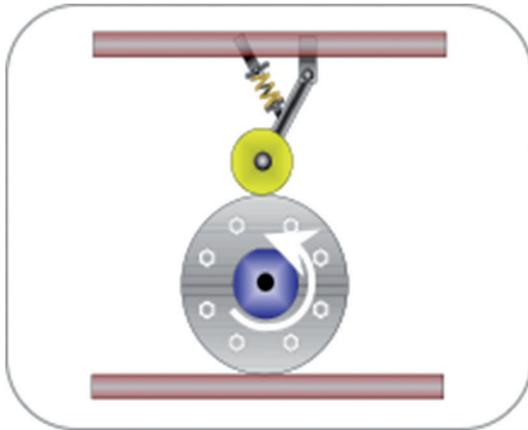
Los odómetros juegan un papel fundamental en la localización longitudinal de las anomalías detectadas en la tubería. La tecnología seleccionada para el cálculo de la distancia está basada en sensores magnéticos. Los odómetros están constituidos por ruedas que entran en contacto con la tubería donde se instalan los sensores magnéticos de "efecto hall" que envían una serie de pulsos por cada rotación de la rueda, en la Fig. 6 se muestra el esquema del odómetro utilizado en la herramienta. El software incorporado en el módulo de control se encarga de convertir estos pulsos en distancia recorrida.

Este módulo requiere un gran procesamiento de software para poder calcular en todo momento la distancia recorrida por la herramienta inteligente. Existen ciertos factores que afectan la exactitud de los sensores de distancia e inducen errores en el cálculo del desplazamiento lineal real de la herramienta. Las principales fuentes de error son el desgaste del material en las ruedas por la fricción y la rotación de la herramienta dentro de la tubería; razón por la cual en la herramienta incorpora como mínimo dos odómetros los cuales proveen redundancia de información que facilita el análisis de tendencias dinámicas.

Por último, para verificar las condiciones de adherencia entre la superficie de la rueda y las diversas superficies de la tubería, se ubicaron elementos que modificaron el coeficiente de

fricción y se implementaron modificaciones sobre la superficie del tubo, se simuló de este modo las variaciones que se presentan durante una corrida regular de una herramienta de tal tipo.

FIG. 6. ESQUEMA DEL ODÓMETRO



Fuente: Los autores

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación de las tecnologías se implementaron dos módulos; uno validado en una línea real y el otro en el laboratorio [12].

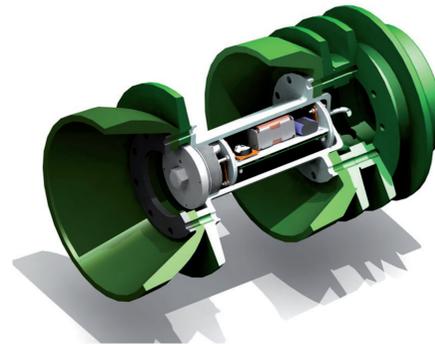
Las tecnologías seleccionadas para la medición de presión, temperatura y distancia fueron implementadas y evaluadas en el laboratorio. Con un software especializado de modelamiento, se realizó el diseño y posteriormente la construcción de los encapsulados mecánicos, que permiten proteger la tecnología incorporada en el marrano de limpieza [9]-[12].

El proceso de validación del desempeño de la tecnología en condiciones reales, se realizó en dos pruebas de 24 horas cada una, en una línea de transporte tipo poliducto de 80km de recorrido de la empresa colombiana de petróleo ECOPETROL.

En la Fig. 7 se aprecia el esquema del montaje final del ensamble mecánico y del módulo que contiene la cápsula de parámetros operacionales en la herramienta de limpieza.

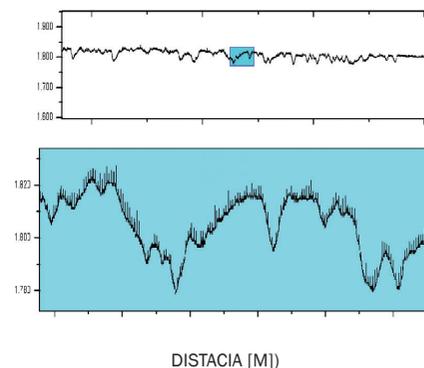
En la Fig. 8 se presenta el perfil de presión en función de la distancia recorrida registrado por la herramienta en condiciones reales [13] y en la Fig. 9 se aprecia el estado final de la herramienta después de la corrida real.

FIG. 7. ESQUEMA DEL MÓDULO DE SENSORES DE LA HERRAMIENTA



Fuente: Los autores

FIG. 8. PERFIL DE PRESIÓN EN CORRIDA REAL (PRESIÓN [PSI] VS



Fuente: Los autores



FIG. 9. ESTADO FINAL DE LA HERRAMIENTA EVALUADA EN UN POLIDUCTO DE ECOPETROL

Fuente: Los autores

Estas pruebas comprobaron la repetibilidad y confiabilidad de las medidas, pues permitieron obtener perfiles detallados de temperatura y presión de la tubería en función de la distancia recorrida y el tiempo [11]-[13]. A su vez, se pudo corroborar la robustez de la herramienta para soportar altas presiones y vibraciones. La información obtenida en la inspección se constituye en una herramienta valiosa para el cálculo de la vida útil de la tubería y detección de anomalías críticas entre otras [13], [14].

IV. CONCLUSIONES

La tecnología desarrollada permite obtener información de la tubería a partir de la evaluación de tendencias geométricas y operacionales esenciales en la viabilidad de una inspección de la línea con tecnologías especializadas. Con un posterior refinamiento de la herramienta se permitirá identificar problemas de corrosión localizada, identificar zonas de alto riesgo de ruptura, definir acciones en los planes de aseguramiento de la integridad de los sistemas de transporte y optimizar modelos matemáticos de simulación.

La herramienta desarrollada y evaluada en una línea real permite la medición de parámetros de operación y anomalías geométricas en función de la distancia recorrida. El marrano C.I.C está concebido para ser utilizado de modo regular por el operador, al aprovechar principalmente corridas rutinarias de limpieza. De este modo los servicios prestados, a diferencia de lo que ocurre actualmente con el mercado de herramientas instrumentadas, no son de carácter puntual sino de seguimiento y control a través de los años. La herramienta recogerá datos a bajo costo y el análisis de los mismos aportará al operador información valiosa sobre el estado de la tubería, entre estos, el grado de residuos, posibles daños geométricos y parámetros operacionales. Esta información que podrá integrarse en el plan de mantenimiento, permitirá la toma de decisiones y ayudará a obtener un panorama de riesgos gracias al seguimiento de los cambios que sufre la línea con el tiempo.

A su vez, la herramienta suministra información valiosa antes de implementar técnicas de inspección costosas como una corrida de inspección inteligente con ultrasonidos o MFL, lo cual faculta al operador para modificar esas condiciones como requisito previo a la inspección inteligente y la detección y dimensionamiento de daños geométricos.

La herramienta tiene características modulares que le confieren gran flexibilidad, ésta es una de sus ventajas competitivas en el mercado.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Colombiano del Petróleo - ICP y a la Vicepresidencia de Transportes de la Empresa Colombiana de Petróleo - ECOPETROL, por el apoyo y las facilidades prestadas durante la prueba piloto, al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología - COLCIENCIAS, por el apoyo financiero

del proyecto: Tecnologías PIG para la Calibración Interna y la Medida de Parámetros de Operación en Líneas de Transporte de Hidrocarburos.

REFERENCIAS

- [1] ASME B 31.8 gas transmission and distribution piping systems.
- [2] ASME B 31.4 pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquid's.
- [3] The Pipeline Pigging Course. In: Pipeline Pigging & Integrity Management Conference, Clarion, 2003.
- [4] Programa para el Manejo de la Corrosión Interna y Prototipo de Marrano Inyector del Sistema de Transporte de Gas Ballena-Barrancabermeja de Centragás S.A. Proyecto cofinanciado por el SENA para el sector gas, Corporación para la Investigación de la Corrosión, Jun 2004.
- [5] Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. In: API Standard. First Edition, p. 1160, Nov 2001.
- [6] Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines, In: Pipeline Operator Forum, Version 3.2, Ene 2005.
- [7] Pipeline Safety: Pipeline Integrity Management in High Consequence Areas Proposed Rule, 49 CFR Part. DOT, 2003, p. 192 - 195.
- [8] In-Line Nondestructive Inspection of Pipelines, In: NACE International Publication. 35100.
- [9] Automatic Data Acquisition System For Offshore Oil Pipeline Magnetic Flux Leakage On-Line Inspection, Tao Jin Peiwen, Shanghai Jiao Tong University/Journal of the Japan Petroleum Institute, 2005.
- [10] Integrated Visualization for Geometry PIG Data.pdf, Bok Dong Kim Kyungpook National University, Daegu, South Korea, Department of Computer Engineering, Korea Gas Corporation, 426-790 Ansan, South Korea, 2006.
- [11] Advances in Line Inspection Technology for Pipeline Integrity, Jeff Sutherland, BJ services, 2000.
- [12] R. Worthingham T. Morrison, N.S. Mangat and G. Desjardins. Bayesian Estimates Of Measurement Error For In-Line Inspection And Field Tools Proceeds of IPC. International Pipeline Conference 2002. Calgary, Alberta, Canada.
- [13] Desarrollo de una herramienta para determinar las pérdidas de presión interna en líneas de transporte de hidrocarburos a través del uso de sensores electromecánicos, orden de servicio 511956 entre el CIC y el ICP, diciembre de 2007.
- [14] Assessment and analysis of pipeline buckles, Inessa L Yablonskikh et. al., PPSA Aberdeen Seminar 2007.