

Sistema de Monitoreo Electrónico de Desplazamiento de Tubos de Extensión para Junta Expansiva

J. Campuzano-Cervantes^a, F. Meléndez-Pertuz^a, B. Núñez-Perez^b, J. Simancas-García^{a*}

^a Programa de Ingeniería Electrónica. Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica. Universidad de la Costa, Colombia.

^b Departamento de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de la Costa, Colombia.

Resumen

En este trabajo se plantea el desarrollo de un dispositivo, llamado junta expansiva, para mitigar la ruptura de tuberías para el transporte de hidrocarburos, causada por deslizamientos de tierra o dilatación lineal. La solución propuesta, involucra el desplazamiento de 2 tubos que alargan el dispositivo, aliviando la tensión y retardando la ruptura de la tubería. La medida del desplazamiento de esos tubos, requiere ser monitoreada para determinar qué tan pronto ocurrirá la ruptura y emprender las acciones correctivas para evitar el derramamiento del hidrocarburo, razón por la que se plantea este sistema de monitoreo electrónico con interfaz gráfica de usuario que facilita la visualización del desplazamiento de manera remota. De esta forma se complementa la junta expansiva y se ofrece la posibilidad al operador de mantenimiento de la tubería monitoreada, de reaccionar a tiempo. Las pruebas ejecutadas mostraron la funcionalidad del sistema de monitoreo propuesto en la junta expansiva.

Palabras Clave:

Junta expansiva, sistema de control monitoreado, transporte de hidrocarburos, tuberías, interfaz gráfica.

1. Introducción

A nivel mundial, el transporte de petróleo crudo así como del gas natural, se ha convertido en una importante operación de ingeniería, por ser combustibles de primera necesidad y de los principales insumos que generan productos que dinamizan los sistemas económicos globales (Gagnon et al., 2009). Estos elementos son fuentes de energía primordiales utilizadas en la actualidad y de ellos dependen gran parte las actividades económicas mundiales, directa o indirectamente.

La importancia de estas estructuras petrolíferas y de gas es tal, que se han propuestos sistemas de mantenimiento automatizado para evitar la interrupción de sus operaciones (Urdaneta et al., 2012). Sin embargo, hay eventos naturales como los deslizamientos de tierra causados por fallas geológicas, por actividad sísmica entre otros, que traen consigo problemas en el sector de la industria de transporte de hidrocarburos debido a que su infraestructura sufre daños, como rupturas de líneas de tuberías, pérdida del producto, suspensión del servicio, causando costos imprevistos por reparaciones, entre otros problemas.

Además de esto, los derramamientos de hidrocarburos generan impactos ambientales, debido a que son sustancias tóxicas, cuyos efectos en los ecosistemas pueden mantenerse por décadas (Green Peace, 2012), afectando la fauna, la flora y en algunos casos, a

seres humanos que habiten cerca del sector. Precisamente este año, en el Perú declararon en estado de emergencia a más de 6 comunidades en el distrito de Morona por causa por el derrame de petróleo crudo del Ramal Norte del oleoducto norperuano, lo que contaminó las aguas y alimentos usados para su sustento (El Comercio, 2016).

La necesidad de proteger el estado de las tuberías utilizadas para el transporte de hidrocarburos construidos bajo tierra, frente a deslizamientos de tierra ocasionados por fallas geológicas, ha generado que se planteen diferentes soluciones mecánicas con el fin de prevenir rupturas (Kuhn, 1958). Una de estas es la junta expansiva diseñada y construida de manera conjunta por investigadores de la Universidad de la Costa e ingenieros de la empresa SOLUTEC SAS (Empresa de consultores en ingeniería ubicada en Barranquilla - Colombia) con apoyo de Colciencias (Entidad para el fomento de la investigación e innovación en Colombia), la cual tiene como función “el alivio de tensión en las tuberías enterradas de conducción de crudo o gas natural generadas por el desplazamiento de los suelos” (Carbonell-Cera, 2015) evitando la ruptura inmediata y suspensión del servicio. Básicamente, ésta consiste en una carcasa con dos tubos extensores en su interior asomados en sus extremos, y es en estos extremos donde se ensambla la tubería en potencial peligro de ruptura por terreno deslizante. Al sentir el esfuerzo ocasionado por deslizamiento de tierra sobre el ducto, éstos salen del interior, dándole más longitud a toda la junta, y por ende aliviando la tensión sobre la tubería. La Figura 1 muestra un diagrama básico estructural de la junta para comprender mejor su funcionamiento.

* Autor en correspondencia.

Correo electrónico: jsimanca3@cuc.edu.co (J. Simancas-García)

Es importante saber la posición de los brazos extensores de la estructura en todo momento, ya que esto permitirá identificar cuándo sucedió algún evento y tomar las acciones pertinentes a tiempo.

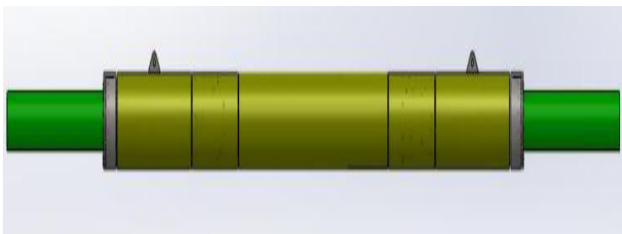


Figura 1. Estructura básica de la junta expansiva.

Este trabajo, presenta el diseño de un sistema de instrumentación del desplazamiento de los brazos extensores como complemento de la junta desarrollada (Carbonell-Cera, 2015), con un sistema de monitoreo apoyado en tecnología de PLC, que, mediante una interfaz gráfica de desarrollo propio, mostrará la medida requerida en unidades de distancia. Para tener la medida del desplazamiento de los brazos de extensión, se utilizaron sensores de distancia apuntando a los topes internos (que son la parte final dentro de la carcasa de estos brazos) que detectan la distancia hasta la tapa lateral de la carcasa, mostrando así la medida del desplazamiento. Con este aporte, se podrá conocer el estado de la junta expansiva desde una estación de supervisión, para generar alertas según el valor de la variable monitoreada y así tomar acciones preventivas para evitar rupturas que traigan como consecuencia la suspensión del servicio, contaminación del medio ambiente y pérdidas económicas a la industria. Esto le da un carácter novedoso e innovador a la junta expansiva, ya que no se cuenta en el mercado con un dispositivo que permita ejercer este nivel de supervisión. Como queda claro, el artículo tiene como eje central el desarrollo de la instrumentación con la cual se dotará a la junta expansiva para detectar el desplazamiento y potencial ruptura de esta última. Si bien, no es objeto de este trabajo el comportamiento físico de la junta, se presentan los gráficos de desplazamiento basados en los datos entregados por la instrumentación desarrollada, para validar el correcto funcionamiento de la misma en la detección de desplazamientos peligrosos mediante las señales medidas. También se presenta en la primera sección del artículo un diagrama de los movimientos experimentados por las tuberías en presencia de deslizamientos de suelos, para ilustrar la problemática que se quiere mitigar mediante el sistema propuesto.

El documento presenta la siguiente organización: se describen algunos antecedentes encontrados en la literatura científica sobre sistemas de monitoreo para tuberías, seguidamente se presenta la metodología seguida en la ejecución del proyecto, se continúa con la sección de resultados y discusión, para finalizar con algunas conclusiones obtenidas a partir de la implementación del sistema.

2. Sistema de monitoreo

Los sistemas de monitoreo a distancia, son ampliamente utilizados en la vigilancia y control de procesos industriales, pues permiten mantener informado al operario o todo el personal de operación sobre la situación actual de los procesos en ejecución, lo que posibilita actuar oportunamente sin ser necesario estar

presente. Esto tiene como ventaja vigilar procesos que se encuentran en zonas peligrosas o remotas, evitando riesgos o gastos de transporte, cumpliendo eficientemente con lo requerido.

2.1. Monitoreo con tecnología GPRS

La tecnología *GPRS* (*General Packet Radio Services*, Servicio General de Paquetes por Radio) se basa en la conmutación de paquetes sobre la red *GSM* de telefonía celular. Posee buenas características en cuanto a tasas de transmisión de datos, acceso a internet, conexión permanente, tiempo de establecimiento de conexión rápida, pago por cantidad de información transmitida y no por tiempo, entre otras. La tecnología *GPRS* permite que los datos *GSM* sean compatibles con las redes WAN y LAN mediante el protocolo *TCP/IP*. Al realizar una transmisión de datos, la tecnología encapsula paquetes con cabeceras que tienen la dirección de destino, así permite transportar diferentes mensajes por el mismo medio y diferente destino sin tener un canal dedicado y utiliza la red *GSM* únicamente cuando existan datos que enviar o recibir. Este uso eficiente de la red la hace una tecnología ideal para aplicaciones de datos (Halonen et al., 2003).

Algunos pros y contras asociados a la utilización de esta tecnología en monitoreo, se presentan a continuación (Qurat.ul.Ain et al., 2015):

- Los dispositivos de campo pueden ser regulados desde cualquier lugar.
- Se tiene retroalimentación de los dispositivos utilizados.
- Diseño de bajo precio y eficiente.
- Seguimiento en tiempo real.
- *GSM* es sensible a la potencia de la señal de la red.

Por los beneficios que ofrece, la red *GSM* es ampliamente utilizada en el desarrollo de proyectos que requieran de transmisión de datos. En el sector medioambiental y agrícola, por ejemplo, se han desarrollado estaciones de monitoreo y adquisición de datos de variables meteorológicas (*CO*, *CO2*, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa); incluso algunas de ellas utilizando PLC S7 1200 y módulo de comunicación CP 1249-7, equipos de Siemens, transmitiendo mediante la red *GSM* los datos medidos en la estación hacia un servidor OPC y con visualización en una interfaz gráfica desarrollada en WINCC Flexible (Maldonado, 2013; Ortega Castro and García Abad, 2015).

También esta tecnología se ha aplicado en plataformas de monitoreo climático y sistemas de alertas tempranas, como en (Azid et al., 2015) quienes diseñan una solución preventiva al problema de inundaciones, evaluando el nivel de agua y enviando actualizaciones de esta medida mediante mensajes de texto (SMS), y alerta temprana si se supera un nivel establecido previamente. Existen casos específicos de sistemas de alerta temprana que requieren monitoreo en tiempo real, como el estudiado en (Cama-Pinto et al., 2016), que ilustra la aparición de inundaciones repentinas en una ciudad por causa de lluvias y falta de alcantarillado pluvial, lo que haría necesaria la utilización de tecnología *GSM*. En este mismo sentido, se han diseñado sistemas que utilizan los sensores COTS de los *smartphones* para detectar sismos, utilizando para ello varios teléfonos móviles distribuidos formando una red, que se encargan de detectar picos sísmicos, su análisis y notificación, formando un sistema de alertas tempranas, como una alternativa de mitigación de las consecuencias de los desastres naturales. El procesamiento se realiza de manera espacial y temporal, por la precisión que ofrece esta modalidad, y su adaptabilidad a distintas configuraciones geográficas (Vizuet et al., 2015).

2.2. Monitoreo en el sector industrial

La tecnología inalámbrica GSM en control de procesos industriales es una manera sencilla de mantener informado al operario sobre la situación actual del proceso, lo que posibilita actuar oportunamente sobre el mismo sin ser necesario estar presente.

Los sistemas de monitoreo utilizando plataformas GSM también son aplicados en procesos industriales como en sistema de procesos modulares, así como se puede ver en el trabajo de (Mejía-Granda and Quito-Pérez, 2013) donde realizaron un sistema de control y monitoreo de un sistema de proceso modular que tiene como función mezclar 3 tipos de líquidos que se encuentran en tanques independientes utilizando sensores de nivel y bombas neumáticas. Para la adquisición y procesamiento de datos se utilizó un PLC TWIDO 20DTK y para el establecimiento de conexión con la red GSM un módem GSM SR2MOD03. El desarrollo de la interfaz gráfica se realizó en Lookout de National Instruments.

En (Khan et al., 2014) se desarrolló un sistema de monitoreo de condiciones ambientales de cuartos de BTS (Base Transceiver Station) remotos, con ayuda de microcontroladores para captura de variables (temperatura, humedad, voltaje de baterías y encendido de generador). Las señales capturadas son enviadas por GSM a través de mensajes de textos que son recibidos en la central de monitoreo para su despliegue en una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Visual Basic. Para el funcionamiento general del sistema, proponen el esquema que se muestra en la Figura 2.

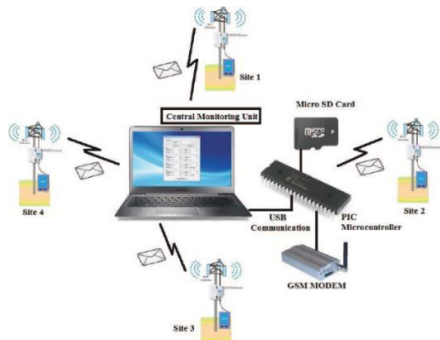


Figura 2. Esquema del sistema propuesto en (Khan et al., 2014)

El sistema permite el monitoreo y la realización de ajustes de control de acuerdo a los valores recibidos de las variables en los sitios remotos vía GSM, por intermedio de mensajes de texto.

En (Qurat.ul.Ain et al., 2015) se presenta un prototipo de un sistema SCADA que utiliza comunicación GSM entre diferentes estaciones remotas y una estación host con interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface). La medición de los parámetros se hace a través de microcontroladores monitoreados por medio de computador para visualización. La comunicación entre los microcontroladores y el computador se realiza por GSM, el cual transfiere en tiempo real, datos del proceso y control. Los componentes que forman el sistema SCADA propuesto se muestran en la Figura 3.

El sistema monitorea tres estaciones remotas que capturan datos de diferentes variables, velocidad de un motor dc, temperatura, humedad relativa, voltaje y estado de un motor paso a paso. Las pruebas realizadas muestran la funcionalidad del sistema, desplegando los valores de las variables en la interfaz

gráfica de usuario, a la que le desarrollaron pestañas de visualización para revisar cada estación remota.

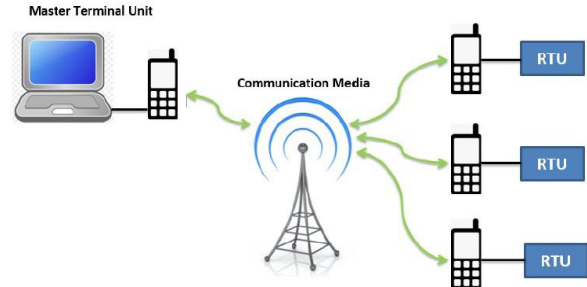


Figura 3. Componentes del sistema SCADA propuesto en (Qurat.ul.Ain et al., 2015)

En (Baviskar et al., 2015) se realiza un revisión de las tecnologías inalámbricas de alto rendimiento implementadas en monitoreo remoto y control de cargas. Esta combinación de comunicaciones y control ha revolucionado los sistemas de automatización industrial, comercial y residencial. El análisis de estas tecnologías se hace desde el punto de vista del consumo de potencia, ya que para ciertos rangos de frecuencia de aplicación, el consumo puede llegar a ser una limitante. Debido a lo anterior, la tecnología a implementarse debe escogerse teniendo en cuenta este criterio. El análisis comparativo se realiza mediante un conjunto de hechos puntuales relacionados con los protocolos de comunicación considerados para sistemas de automatización y control. Los protocolos considerados son: Zigbee, WiFi, Bluetooth, UWB, GSM, Z-Wave, Insteon.

En (Baghyasree et al., 2014) se presenta un sistema de monitoreo remoto por video para un ambiente industrial para propósitos de seguridad través de una red inalámbrica. El propósito del sistema propuesto es proteger la industria de situaciones riesgosas. El sistema consta de un dispositivo de monitoreo en video en tiempo real para detectar intrusos. Utiliza cámaras inalámbricas y GSM para el envío de mensajes de texto de alerta al teléfono móvil del supervisor. El diagrama de bloques del sistema desarrollado se observa en la Figura 4.

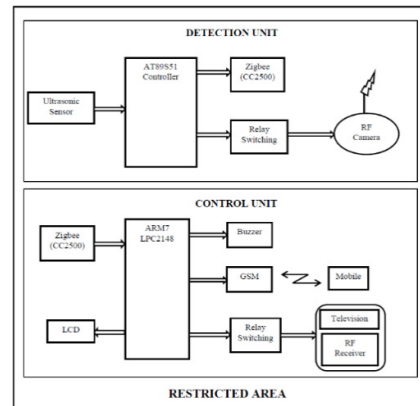


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema propuesto en (Baghyasree et al., 2014)

En el funcionamiento general del sistema, se aprecia que ante la detección de un intruso por parte del sensor ultrasónico, los dispositivos Zigbee se comunican, conectando con la unidad de control. Al mismo tiempo en la unidad de detección se da inicio a

la captura y envío del video del área de la intrusión (área cercana al sensor ultrasónico). En esta unidad se aprecia el video transmitido por la cámara inalámbrica y se realiza el envío de mensaje de texto por red GSM al supervisor o encargado, que activará el protocolo establecido para eventos de ese tipo. En esta aplicación, la red GSM permite el envío del mensaje de texto solamente, la cámara inalámbrica tiene su receptor sintonizado en la unidad de control.

2.3. Monitoreo en tuberías para transporte de hidrocarburos

Con el desarrollo de la industrialización a nivel mundial y el aumento de la demanda de energía global, el petróleo, el gas natural y toda la infraestructura asociada, se han convertido en activos de alta importancia para las naciones. Mantener el progreso económico de los países, está en función de la protección de estos recursos y las infraestructuras asociadas a su producción y transporte. En ese panorama, las tuberías para el transporte de hidrocarburos, han cobrado mucha relevancia en las economías, al punto que se ha vuelto prioritaria su protección, dado lo extensas que pueden llegar a ser. En Colombia, según la página oficial de Ecopetrol, hay más de 8.500 kilómetros de poliductos y oleoductos, que van desde los centros de producción hasta la refinería y puertos en los océanos atlántico y pacífico.

En el trabajo de (Fazzini et al., 2009) se indica que las fallas en tuberías de transporte de hidrocarburos están relacionadas principalmente con el desplazamiento de tierra en sectores enterrados en suelos inestables. A medida que aumenta la fuerza por la masa de tierra, es cada vez más difícil mantener la capacidad de la tubería para soportar los desplazamientos. Debido a esto, se producen grietas y deformaciones significativas de esta que derivan en fallas, las cuales han sido detalladas por algunos autores (Babín Vich and Gómez Ortiz, 2010; Mella Contreras, 2013). Al analizar fallas de tubería en deslizamiento de tierra se deben identificar los esfuerzos longitudinales a compresión, esfuerzos longitudinales a tensión y esfuerzos transversales. Generalmente las tuberías están sujetas a movimientos transversales y longitudinales. En los transversales el desplazamiento es perpendicular al eje de la tubería mientras que en los movimientos longitudinales, es paralelo a este. Los dos tipos de movimientos pueden generar fallas en el ducto (Cabeza Pinzon, 2009).

En (Dash and Jain, 2007) se establece que de acuerdo a la posición en que la tubería atraviese el terreno en condición de deformación, sufrirá esfuerzos por tensión, compresión, flexión o combinaciones de estos. De esta forma, se establece que la tubería podría atravesar la zona del deslizamiento de forma arbitraria, en la dirección del movimiento de tierra o de forma transversal. Los esfuerzos ocasionados en cada caso, se observan en la Figura 5.

La manifestación de un movimiento de tierra como un terremoto, puede ocasionar daños en diferentes zonas de una tubería, debido a los variados deslizamientos que ocasiona. En esta condición es difícil ejercer protección sobre la tubería, debido al carácter múltiple del problema.

Existen varias tecnologías diseñadas para vigilar y proteger la integridad de los ductos, siendo la mayoría de éstas establecidas específicamente para la detección de fugas mediante la medición de diferentes variables del proceso. Como ejemplo de esto se tiene la toma de medidas dentro o fuera de las tuberías. Las mediciones dentro de la tubería pueden ser presión, flujo y temperatura. Las mediciones exteriores, se basan en la vigilancia de las zonas de la tubería, cámaras de protección de tuberías,

detección de fuego en las tuberías, y fugas de líquidos. Generalmente, una red transmite las mediciones recogidas de diferentes sensores distribuidos de forma dispersa a través de la tubería. Las redes cableadas por ejemplo, se enfrentan a varios problemas de fiabilidad y seguridad pues están expuestas a ambientes salubres (Imad Jawhar et al., 2007).

Con base en estas consideraciones, en (Maldonado-Tinizaray and Espín-Estévez, 2008) se realiza un sistema de monitoreo para la vigilancia del estado de un poliducto en la ciudad de Quito (Ecuador) mediante la medición de variables (temperatura, presión, vibración) y envío a una estación central mediante la red GSM. Previamente se establecieron los puntos más vulnerables del poliducto, con una caracterización de porcentaje de riesgo, kilómetro por kilómetro, para determinar los puntos de instalación de los sensores. El software de adquisición de datos fue desarrollado en Visual Basic, utilizando un microcontrolador para la adquisición y procesamiento de señales, con un módulo de transmisión SIGNALIX MT-101 para la transmisión de los datos. Además de esto, se incorpora un sistema de panel solar para la alimentación en caso de que no existan líneas de servicio eléctrico cerca de la instalación. El sistema completo fue probado utilizando solamente la señal detectada por el sensor de temperatura, por ser esta medida de carácter no invasivo. Las pruebas de presión y vibraciones, requerían procedimientos invasivos no autorizados, por lo tanto no se ejecutaron. Las pruebas realizadas, se organizan en archivos históricos, teniendo en cuenta cada sensor evaluado en una interfaz visual. La arquitectura de esta propuesta, se puede ver en la Figura 6.

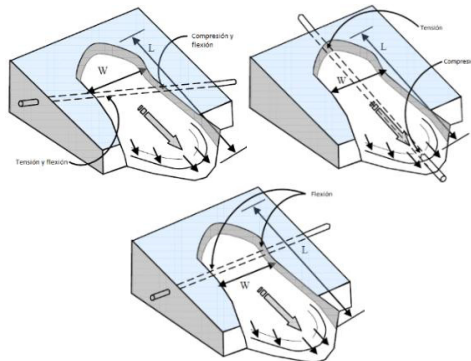


Figura 5. Posición en la que una tubería puede atravesar un deslizamiento y esfuerzos sufridos (Dash and Jain, 2007)

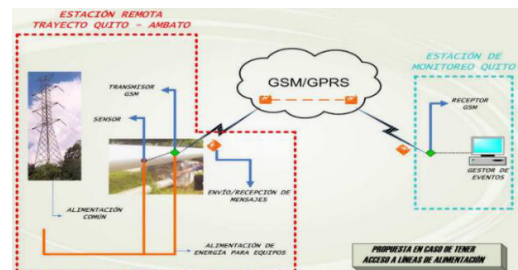


Figura 6. Arquitectura del sistema de monitoreo propuesto en (Maldonado-Tinizaray and Espín-Estévez, 2008).

El uso de las tuberías subterráneas para el transporte de fluidos es muy común en todo el mundo. Aunque la tubería bajo tierra está protegida de diferentes peligros a los que está sometida, tales

como el vandalismo, también presenta algunas desventajas, debido a que los largos tramos de tubería atraviesan extensos terrenos con variadas condiciones ambientales y diversas características del suelo, lo cual puede ser causa de fallas en la línea de transporte. Por tal motivo, el monitoreo de las tuberías es de suma importancia para proteger su integridad. En este contexto, se justifica el desarrollo del sistema de monitoreo propuesto, ya que complementa a la junta expansiva, haciéndola un dispositivo único en el mercado en contar con medición remota del estado de una tubería, lo cual supone un avance en el estado de la técnica.

3. Metodología

Para el desarrollo del sistema de monitoreo electrónico para la junta expansiva inicialmente se propuso investigar sobre los sistemas de monitoreo, parámetros para diseño e implementación, para luego identificar e integrar el hardware de medición y comunicación adecuados para el prototipo. Seguidamente, se trazó el objetivo de diseñar e implementar una interfaz gráfica para visualizar los datos adquiridos en unidades de longitud, representativo del desplazamiento sufrido por los tubos de extensión, para finalmente comprobar la funcionalidad del sistema y la interfaz gráfica desarrollada, integrándolo a la junta expansiva ya probada.

Para alcanzar los objetivos planteados en el desarrollo del sistema de monitoreo, se propuso una metodología dividida en fases secuenciales. Este proyecto fue propicio para este tipo de enfoque, debido a que se contó con el apoyo del equipo de ingeniería de la empresa SOLUTEC, que respaldó las decisiones tomadas con base en su experiencia. Esto redujo el tiempo de la etapa de selección de hardware, que de otra forma hubiera resultado más extensa y riesgosa en cuanto a disponibilidad y funcionalidad de equipos. La ventaja de utilizar esta metodología, es que la experiencia de la empresa en el sector evitó divagaciones en cuanto a la consideración de tecnologías poco convenientes en esta aplicación concreta, que resultarían en una selección de equipos poco ventajosa. Se facilitó la fase de implementación debido al conocimiento técnico de los ingenieros de SOLUTEC en el uso de la tecnología seleccionada.

3.1. Selección e integración del hardware

En esta fase se procedió con base en los criterios establecidos y se seleccionó el hardware requerido para el desarrollo de la solución, incluyendo los sensores más adecuados para este tipo de medida, y los equipos para adquisición procesamiento y envío de datos. Con toda esta información, ya fue posible establecer una arquitectura general del sistema. Estando en este punto, se procedió con la adquisición de toda la tecnología establecida y se dio inicio a la programación básica de los módulos adquiridos, así como a la calibración y prueba de los sensores. Una vez ejecutadas estas acciones, se procedió con las pruebas de envío y recepción exitosa de datos, para concluir la integración de todo el hardware.

3.2. Configuración general de los equipos y desarrollo de la interfaz gráfica

Para el desarrollo de la interfaz gráfica, se priorizó en la visualización de los datos correspondientes al desplazamiento de

los tubos de extensión de manera animada y amigable, siendo éste el principal objetivo del sistema de monitoreo. En esta fase, se inició con algunos diseños básicos de la interfaz, buscando principalmente probar su funcionalidad en el despliegue de los datos de desplazamiento previamente capturados. Una vez verificado esto, se procedió a la depuración gráfica de la misma, e incorporación de funcionalidades adicionales como registro de histórico de desplazamientos, variación del tiempo de envío de datos e idioma, entre otras.

3.3. Pruebas del sistema completo

Se procedió con la ejecución de pruebas del sistema de monitoreo integrado con la junta expansiva ya desarrollada, iniciando con el diseño de la prueba de simulación de la tensión ejercida por un deslizamiento de tierra. Se generó un desplazamiento en uno de los tubos extensores, se capturó mediante el sensor láser y se envió de forma remota a un computador vía internet donde gráficamente se pudo observar el desplazamiento en unidades de longitud.

4. Resultados y discusión

4.1. Criterios para selección de tecnologías

Como resultado de la actividad de revisión bibliográfica y técnica del estado actual de las tecnologías utilizadas en telemetría, y las reuniones técnicas, se establecieron algunos criterios a tener en cuenta en la selección del hardware a implementar en la solución propuesta. Se optó por revisar la utilización de un sistema embebido (hardware con microcontrolador) o un PLC, teniendo en cuenta:

- Robustez de la tecnología: se define como la resistencia de los equipos a diferentes condiciones físico - ambientales.
- Frecuencia de muestreo: número de muestras por unidad de tiempo, es importante para la evaluación de señales analógicas. Teniendo en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist, debe ser el doble de la frecuencia de la señal analizada.
- Escalabilidad: el nivel de escalabilidad permite determinar si se puede utilizar la misma tecnología, aun cuando se amplían los requisitos del sistema (inclusión de nuevas variables a medir).
- Fuente de alimentación: Pueden ser fuentes DC externas, fácilmente suplidas por una batería o alimentación AC con fuente de poder interna.

Por petición expresa de la empresa SOLUTEC, conocedora del tema de transporte de hidrocarburos, se ponderaron estos criterios, dándole mayor peso a la robustez y escalabilidad de la solución, por lo que se optó por seleccionar un PLC para la adquisición y procesamiento de los datos, teniendo en cuenta lo agresivo de los ambientes de trabajo en sectores con potenciales rupturas de tuberías, siendo éstos equipos diseñados para el ambiente industrial y de fácil montaje en soportes que aumentan su robustez; y la posibilidad de incluir otras variables a medir en el sistema, como fugas del hidrocarburo transportado, manteniendo el mismo equipo y nivel de protección alcanzado.

En cuanto al sensor de distancia a utilizar, se tuvo en cuenta que debía tener un buen nivel de protección y tecnología de medida adecuada, por el espacio reducido dentro de la junta.

Inicialmente se consideró la posibilidad de ultrasonido, pero debido a la necesidad de direccionamiento para apuntar al tope del brazo de extensión de la junta, se optó por la tecnología láser. Se optó por el sensor 45 LMS de la marca *Rockwell Automation*, atendiendo principalmente a la tecnología empleada en la detección (láser), su nivel de protección, rango de medida y señal de salida. Sus dimensiones también se adaptaban a lo requerido, dada la limitación de espacio dentro de la junta, y disponibilidad comercial.

4.2. Descripción del hardware

Para el desarrollo del sistema de monitoreo electrónico, se utilizó el siguiente hardware, que se obtuvo como resultado de la fase de selección e integración.

Sensores 45LMS (*Laser measurement sensor*). Se seleccionaron los sensores láser de proximidad ROCKWELL con rango de 0,2 a 8 m, salida de 4-20 mA, alimentación de 10 a 30 VDC. Los sensores son instalados dentro de la junta de expansión, y serán usados para captar el desplazamiento de los tubos que están en los extremos del dispositivo. El sensor se utilizará en el modo de operación denominado punto cero. En el modo punto cero se establece un rango máximo de medida (Q2B). Para un objetivo a distancia igual o mayor a Q2B, se causa una salida analógica de 20 mA. Para el rango de 0 mm a Q2B la señal analógica se escala linealmente. (Rockwell Automation, 2012).

Controlador lógico programable (PLC). Es el equipo encargado de procesar la señal recibida por el sensor. Se seleccionó un PLC de la marca SIEMENS, configurado con fuente de tensión PM1207 y CPU 1212C de gama baja, alimentación 24VDC, 14 entradas y 10 salidas digitales. Este equipo cuenta con módulo de comunicación *GSM/GPRS* que se conecta al servidor OPC instalado en el PC y envía los datos utilizando una SIM Card (habilitada con plan de datos previamente contratado con operador local) para la conexión con Internet.

Módulo de comunicación. Se seleccionó el módulo CP 1242-7 marca SIEMENS, comunicable a través de *GSM/GPRS*, con alimentación de 24VDC. Requiere antena de transmisión, también adquirida en el paquete. Para la programación del PLC y la configuración del módulo de comunicación se utilizó la licencia de software de desarrollo STEP7 BASIC. La Figura 7 muestra el PLC utilizado con su módulo de comunicación instalado y antena, que se constituye en la RTU (Unidad Terminal Remota).



Figura 7. PLC en su soporte con módulo de comunicación y antena (RTU).

4.3. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema propuesto, se muestra en la Figura 8.

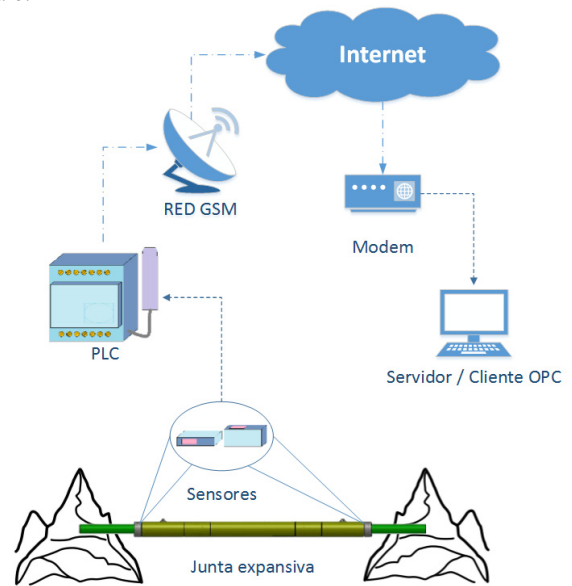


Figura 8. Arquitectura general del sistema propuesto.

Los sensores son los encargados de medir el desplazamiento de los tubos de extensión de la junta. Éstos, mediante la emisión y recepción de luz que es reflejada por una superficie sólida interna en el dispositivo, permiten medir la distancia a la que se encuentra el tubo de extensión de su tope interno, de esta forma se monitorean las elongaciones causadas en la práctica real por los deslizamientos del terreno donde se encuentre instalada la tubería.

La Figura 9 muestra la disposición de los sensores dentro de la junta. Tomando como referencia el extremo derecho de la junta, se aprecia que un esfuerzo de tensión lo suficientemente grande, causado por un deslizamiento de tierra, causaría un desplazamiento del tubo de extensión. La medida del desplazamiento sería el valor $X1$.

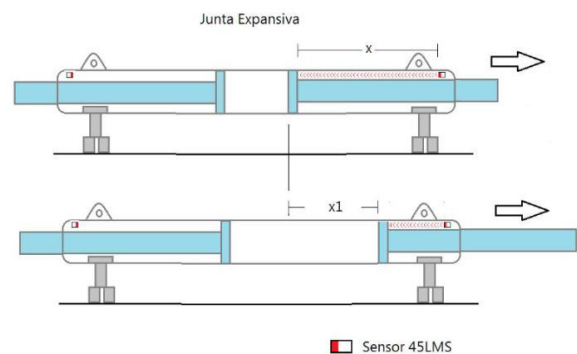


Figura 9. Disposición de los sensores dentro de la junta y medida del desplazamiento de los tubos de extensión

La señal analógica generada por los sensores debido al desplazamiento, es recibida por el PLC a través de los cables de instrumentación. El PLC envía los datos a través del módulo de comunicación *GPRS* al servidor OPC (*Object Linking and Embedding (OLE) for control process*) instalado para el sistema

propuesto. De acuerdo al hardware seleccionado, se instaló el software para centrales de supervisión, Telecontrol Server de Siemens. Para cliente OPC, se instaló *Wincc Runtime* en la central de supervisión para acceder a los datos del desplazamiento de los tubos de extensión a través de módem con acceso a Internet.

Para la configuración y programación de la estación remota, se utilizó el programa *Step 7 V 13* del paquete de software *TIAPORTAL* de Siemens. Inicialmente se seleccionan los equipos que se utilizarán y una vez hecho esto, se procede con la configuración del módulo CP1242-7 insertando los datos necesarios. Posteriormente la configuración de los puertos analógicos del PLC y para finalizar, la programación de funcionamiento de la estación remota.

4.4. Configuración de los puertos analógicos del PLC

Para la configuración de los puertos analógicos, se debe tener en cuenta que por las características del PLC solo es posible variar la configuración de filtrado. El filtrado es utilizado para atenuar ruido que podría existir en la señal, hay que tener en cuenta que mientras mayor sea el número de ciclos del filtrado, más tiempo tardará el PLC en actualizar el dato.

4.5. Programación de funcionamiento de la estación remota

La programación de la estación remota se realizó en lenguaje Ladder y está basado en 5 funciones, cada una con sus correspondientes bloques de datos necesarios para su funcionamiento. En la Figura 10 se muestra listado de los bloques utilizados.

Junta Expansiva	
A_Lectura_de_sensoress [FC1]	A_Dato_sensores [DB11]
B_Com_env_datos [FC4]	B_Envio_datos_DB [DB10]
C_Cambio_tiempo_x_Evento [FC5]	C_Evento_DB [DB13]
D_Com_rec_datos [FC3]	D_Recepcion_de_datos [DB14]
Z_Comunicación [FC2]	Z_Comunicacion_DB [DB8]
	Z_Datos_env [DB1]
	Z_Datos_rec [DB6]

Figura 10. Bloques configurados para el programa del PLC.

Lectura de sensores (A_Lectura_de_sensores): en esta función se realiza la lectura de los puertos analógicos, es decir, las señales de los sensores y el procesamiento de las mismas con el fin de obtener el valor en unidades de distancia de los desplazamientos de los brazos extensores. Estos valores son almacenados en el bloque de datos *Lectura_de_sensores*.

El dato obtenido del convertidor analógico digital a partir de la señal de entrada es de tipo Word (valor que va desde 0 a 27648). Inicialmente se normaliza el valor con respecto a los rangos del tipo de variable, se almacena en una variable auxiliar y posteriormente se escala con respecto al rango de medición configurado en el sensor laser de distancia. El procedimiento de escalar el dato es equivalente a aplicar (1).

$$D = \frac{D_{MAX}}{V_{MAX}} V_i \quad (1)$$

En el bloque principal esta función se ejecuta 2 veces, una por cada sensor.

- **Control de envío de datos (B_Com_env_datos):** en esta función se ejecuta el envío de los datos a la estación central de forma cíclica, es decir cada determinado espacio de tiempo (TE). Inicialmente se actualiza el bloque de datos *Z_Datos_env* el cual contiene los datos

que se enviarán a la estación central, posterior a esto se realiza el control de envío y al finalizar.

- **Cambio de tiempo de envío por evento (Cam_tiempo_x_evento):** el dato principal de esta función es “tiempo de envío de datos” (TE) el cual indica cada cuanto tiempo se realiza la transmisión de información. Este dato tiene 2 formas de ser modificado, la primera es mediante la interfaz gráfica y la segunda de manera automática cuando se presente algún desplazamiento. En esta función se realiza el cambio de TE, producto de la identificación del desplazamiento. Cuando hay un desplazamiento se realiza un envío cada 1 segundo (Capacidad máxima del módulo *GPRS*) por un tiempo de 10 segundos. Al finalizar los 10 segundos, si no se detecta ningún otro desplazamiento, la variable TE vuelve a su valor anterior diferente de 1.
- **Control de recepción de datos (D_Com_recdatos):** esta función se encarga de actualizar el valor de la variable TE en el PLC, cuando ha sido modificada desde la estación central mediante la interfaz gráfica.
- **Control de comunicación (Z_Comunicación):** inicialmente se habilitan los bloques de conexión, desconexión, envío y recepción de datos del módulo CP1242-7 para que puedan ser utilizados. En esta función se controla los estados de conexión entre el módulo de comunicación, el PLC y el servidor mediante una variable. A partir de esta variable, se determina que acción tomar con respecto a la conexión. El diagrama de estado que representa lo mencionado, se puede ver en la Figura 11.

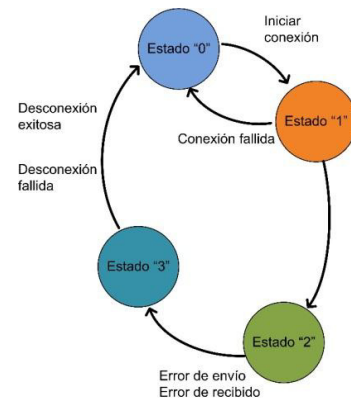


Figura 11. Diagrama de estado del control de conexión.

Estado “0”: es el estado de inicio al encender el PLC, en este estado inmediatamente inicia la conexión con el servidor y pasa al estado “1”. Estado “1”: es el estado de espera a que se establezca una conexión exitosa o por lo contrario exista un error de conexión. En caso de que haya un error de conexión, pasará al estado 0; por lo contrario, si la conexión es exitosa pasará al estado 2. Estado “2”: este estado indica una conexión de trabajo desde el controlador y el módulo CP y desde este punto ya se pueden recibir paquetes de la estación central. En caso de presentarse un error en el envío o recepción de paquete de datos pasará al estado 3. Estado “3”: este estado indica un problema de envío o recepción de datos, en él se procede a realizar una desconexión y pasar al estado 0.

En términos generales, el sistema de monitoreo electrónico de desplazamiento, sigue la lógica que se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 12.

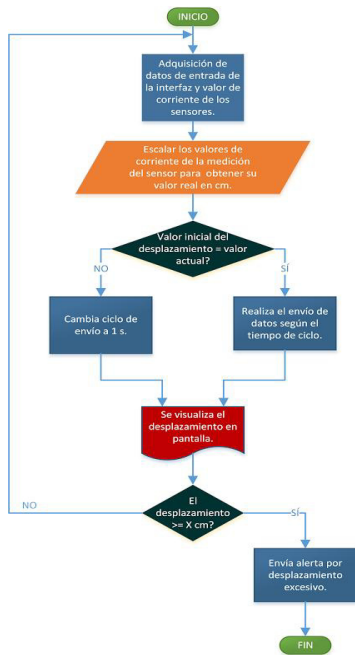


Figura 12. Diagrama de flujo del sistema de monitoreo electrónico de desplazamiento

4.6. Software para registro y visualización de datos

Para el desarrollo del software de registro y simulación, se utilizó el sistema de visualización de procesos de Siemens SIMATIC WinCC. Este es el encargado de mostrar gráficamente el desplazamiento sufrido por los tubos de la junta. Los principales requisitos tenidos en cuenta en su desarrollo, privilegiando los criterios de funcionalidad, confiabilidad y disponibilidad, fueron:

- Presentación de manera amigable y animada del desplazamiento de los tubos.
- Visualización en centímetros del desplazamiento de los tubos.
- Información sobre el estado de la conexión con el servidor.
- Información sobre volúmenes de datos transmitidos y recibidos.
- Estado de la comunicación entre el modem y la CPU en la RTU.
- Indicación del tiempo de ciclo de datos establecido.
- Gráfico de nivel de señal para indicador de cobertura eficiente en la RTU.
- Visualización gráfica (Distancia vs Hora de medición) del desplazamiento de los tubos.
- Establecimiento de idioma.

Con base en estas consideraciones, la interfaz puede acceder a todos los datos requeridos en el servidor OPC, gracias a la conexión GPRS con modem. En la Figura 13 se aprecia la configuración de acceso de la interfaz al servidor.

Una vez se tiene acceso al servidor, los datos pasan a ser capturados para su visualización en los diferentes campos de la

interfaz. En la Figura 14 se aprecia la configuración de captura de datos de desplazamiento de los tubos de extensión en el servidor ya accedido para ser mostrados en los campos Distancia 1 y Distancia 2 de la interfaz gráfica.

En la interfaz gráfica aparece una animación de la junta que de manera visual representa el desplazamiento de los tubos, para dar una idea inmediata al encargado de inspección de la magnitud del desplazamiento, así como un par de reglas que somborean la medida de la distancia. Esto facilita la revisión, pues con una simple mirada, el operario puede deducir lo que está ocurriendo con la junta en el sitio lejano de su instalación. La configuración de esta animación se puede ver en la Figura 15.

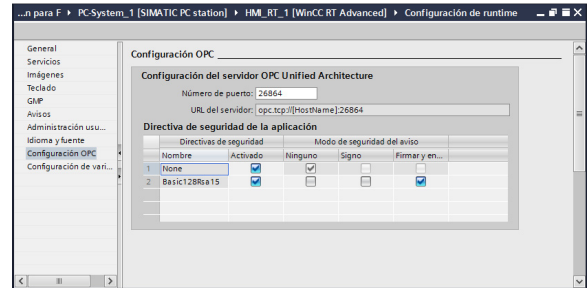


Figura 13. Configuración de acceso de la interfaz al servidor OPC

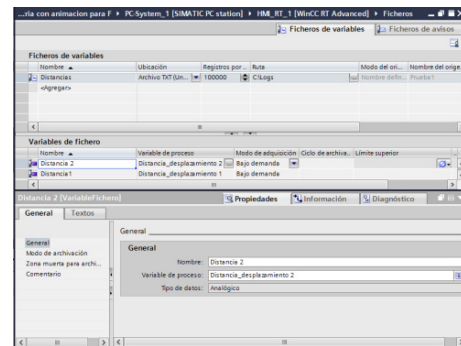


Figura 14. Captura de datos en la interfaz para su visualización



Figura 15. Configuración de la animación de la junta en la interfaz gráfica.

La Figura 16 muestra la imagen de la interfaz gráfica del software, donde resaltan los siguientes elementos:

1. Encabezado, muestra el nombre del dispositivo cuyo desplazamiento se va a monitorear, la junta expansiva

2. Nivel de señal: corresponde al nivel de señal de la conexión GSM/GPRS de la RTU.
3. Variables del sistema: se encuentran variables sobre el estado de la RTU:
4. El ID de célula de radiofrecuencia depende de qué celda de la red celular cubra el sector donde está la estación.
5. Cantidad de bytes de transmisión y recepción.
6. Estado de conexión con el servidor: informa si existe conexión estable de la interfaz con el servidor.
7. Comunicación entre módem y CPU: indica el estado de la conexión entre el módulo de comunicación y el PLC.
8. Conexión GPRS: indica si hay conexión con la red GPRS.
9. Botón Actualizar valores: permite actualizar todos los valores de variables del sistema.
10. Tiempo de ciclo: en esta área se establece el tiempo en segundos, de cada cuánto se hará el registro de los datos mientras no se haya presentado algún evento de alerta o emergencia. Por defecto inicia en 10 segundos.
11. Distancias de la tubería: se muestran los 2 datos correspondientes a la medición del desplazamiento en centímetros.
12. Botones centrales: estos botones permiten desplazarse hacia las otras dos hojas de la interfaz gráfica. La primera hoja ofrece la opción de cambio de idioma, y la tercera ofrece una gráfica de Distancia vs Hora de medición, la interfaz descrita es la página principal y aparece de segunda.
13. Animación de la junta expansiva. Imagen tomada de los planos 3D del dispositivo, que se mueve con la variación real del desplazamiento de los tubos expansores.
14. Reglas de ilustración de la distancia de desplazamiento, que indican con un sombreado el valor de la medición.
15. Botón salir, para salir de la interfaz.

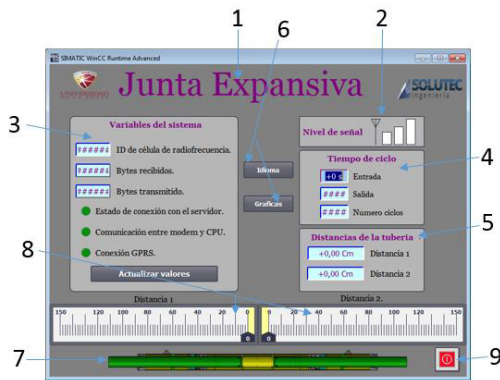


Figura 16. Interfaz gráfica para visualización del desplazamiento de los tubos de extensión.

Es una versión inicial de la interfaz que cumple con los requisitos definidos en primera instancia, pero que sin duda puede cambiar y dada la flexibilidad del software de desarrollo, no supone mayor esfuerzo realizar variaciones en la medida que se desee incluir nuevas funciones o capturar otro tipo de variables.

4.7. Diseño de la prueba de tensión

Para verificar de forma real la operación del sistema de monitoreo, se instalaron los sensores seleccionados en la junta ya

desarrollada. La Figura 17 muestra una imagen de la interconexión de todos los elementos en el espacio dispuesto para la prueba, dentro de las instalaciones de SOLUTEC.

La junta expansiva es un dispositivo, ya construido, probado y patentado (Carbonell-Cera, 2015). Está formado por una carcasa metálica con dos tubos en su interior que sobresalen en sus extremos y con posibilidad de extensión. Su función es aliviar tensiones ocurridas sobre las tuberías, mediante la elongación de esos tubos, y así retardar la ruptura de la tubería. La función del sistema de monitoreo (reivindicación H de la patente), es permitir visualizar de manera remota en una central de supervisión, el desplazamiento de los tubos del interior causados por los esfuerzos de tensión sobre la tubería.



Figura 17. Disposición de todos los equipos para la prueba del sistema de monitoreo electrónico.

En la realización de la prueba, para ejercer la tensión sobre el dispositivo, se optó por utilizar un diferencial de dos toneladas tipo cadena, anclado a dos extremos; un extremo en el cuerpo del tubo de extensión y el otro en el gancho de jalado de un vehículo (como soporte). Ambos extremos estarán fijos y en la medida que el diferencial sea movido, el tubo se desplazará, de forma manual y controlada.

4.8. Desplazamiento de tubos de expansión y captura de datos

Los datos tomados en la prueba fueron organizados en una gráfica de Tiempo Vs Desplazamiento; el software fue programado para medir cada dos minutos y determinar el desplazamiento del tubo de extensión 1. La fuerza utilizada para tirar del dispositivo, fue aproximadamente constante, por un lapso de tres minutos, tiempo en el que se aplicó una fuerza de tensión mayor, generando una perturbación tipo paso escalón en la gráfica y causando un desplazamiento del tubo de más de 10 centímetros. Esta gráfica se presenta a continuación (Figura 18).

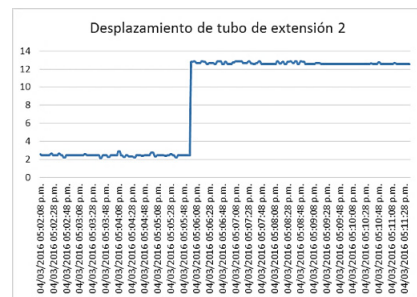


Figura 18 Gráfica Desplazamiento Vs Tiempo, en el tubo de extensión 1.

En el otro extremo de la junta (tubo de extensión 1) por el contrario, no se ejerció ninguna tensión, sin embargo el sensor

instalado en esa parte, detectó pequeñas perturbaciones en el sistema causadas por la tensión inducida por el diferencial en el tubo de extensión 2, que fueron registradas en la gráfica de desplazamiento vs tiempo correspondiente a ese tubo que se presenta en la Figura 19.

La franja de color negro marcada en el tubo de extensión 2, indica la marca que se realizó a tope, es decir, cuando el tubo de expansión no se había movido. La distancia de separación de la marca al tope de la junta es el desplazamiento del tubo, y coincide con lo medido por el sistema de monitoreo. Esto se presenta en la Figura 20.

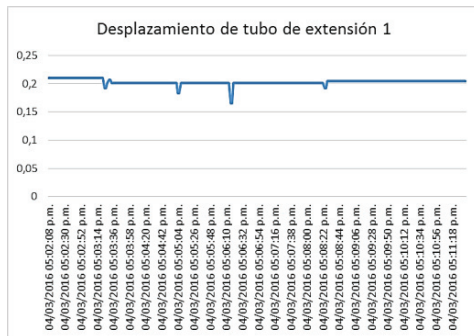


Figura 19. Gráfica Desplazamiento Vs Tiempo, en el tubo de extensión 2.



Figura 20. Marca de desplazamiento del tubo de extensión 2.

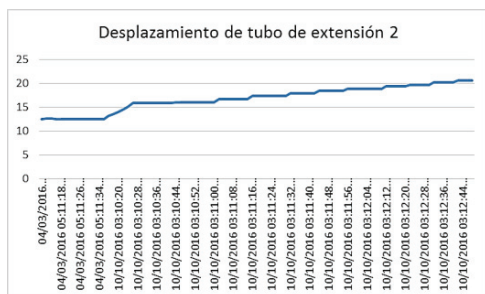


Figura 21. Desplazamiento de 20 cms en el tubo de extensión 1

Debido a la dificultad de generar grandes desplazamientos del tubo de extensión por medios manuales, se estableció la alerta por desplazamiento máximo en 20 cms, y se continuó con el experimento anteriormente planteado, lográndose generar una alerta al llegar a esta distancia. En la gráfica de la Figura 21 se muestra el registro de este desplazamiento causado con ayuda del diferencial. Luego de la perturbación inicial abrupta, el desplazamiento ocurre de forma progresiva.

La interfaz gráfica en la central de supervisión, se muestra el tubo de extensión desplazado en la animación de la junta con color rojo, indicando que se llegó al límite máximo de desplazamiento y que es el momento de tomar medidas correctivas para evitar un derramamiento de fluido. Los datos llegaron a la interfaz vía GSM según se propuso en la arquitectura del sistema. Esto se puede apreciar en la Figura 22.



Figura 22. Registro de desplazamiento límite en la interfaz gráfica con alerta roja

5. Conclusiones

El sistema de monitoreo desarrollado con la junta expansiva, resulta ser una solución novedosa para la problemática de la ruptura de tuberías por deslizamientos de tierra, pues el sistema permite tener visualización de lo que está ocurriendo en el tramo afectado, debido a la instrumentación gráfica desarrollada con Siemens SIMATIC WinCC. Lo anterior permite la toma de acciones correctivas al personal técnico de mantenimiento, reduciendo la posibilidad de pérdidas por derrame de producto transportado. La detección del desplazamiento se realiza mediante sensores de proximidad, los cuales envían su señal a un equipo PLC que cuenta con un módulo de comunicación GSM/GPRS para la transmisión de los datos de desplazamiento a una estación de monitoreo remoto de la empresa SOLUTECH. En la estación de monitoreo los operarios pueden observar el comportamiento de la junta mediante una interfaz gráfica. Los datos de las pruebas realizadas con la junta expansiva demuestran que el sistema de monitoreo, sí detecta adecuadamente los desplazamientos, mediante la comprobación manual de las medidas arrojadas por el sistema. Además, emite las alertas correspondientes, verificando la efectividad de la junta para retardar la ruptura de las tuberías.

El éxito de la implementación se sustentó en la metodología propuesta, la cual permitió volcar toda la experiencia de los ingenieros de SOLUTECH en el desarrollo de la solución al problema planteado de la junta.

Como investigación futura queda el estudio de otra plataforma de desarrollo de hardware alternativa que ofrezca ventajas en costo y tamaño, conservando la robustez de los PLC. Adicionalmente, la inclusión de otras variables para ser detectadas y la emisión de otros tipos de alerta.

English Summary

Electronic monitoring system of displacement of extension tubes for the expansion joint.

Abstract

In this work the development of a device, called an expansion joint, is proposed to mitigate the rupture of pipelines for the transportation of hydrocarbons, caused by landslides or linear expansion. Proposed solution involves the displacement of two tubes which extend the device, relieving tension and slowing the rupture of the pipe. The measurement of displacement needs to be monitored to determine how soon the rupture occur and take corrective actions to prevent spillage of hydrocarbons. Then, a system of electronic monitoring with graphical user interface that facilitates the visualization of displacement remotely is proposed, complementing the expansion joint. Operators can maintain the monitored pipe and react in time. The tests performed showed the functionality of the proposed system in the expansion joint.

Keywords: expansion joint, monitored control systems, transport of hydrocarbons, pipelines, graphic interface.

Agradecimientos

Este proyecto se desarrolló exitosamente gracias al apoyo de Colciencias, entidad para el fomento de la investigación e innovación en Colombia. Se agradece el soporte técnico de la empresa SOLUTEC, en cabeza de los ingenieros Rubén Carbonell Cera, José Miguel Prada Martínez y Héctor Saavedra C. En la Universidad de la Costa, agradecemos la labor administrativa de las ingenieras Zhoe Comas González, Doyreg Maldonado Pérez, Katia Causado Oviedo y Virginia Guerrero Cogollo; así como la colaboración técnica de los docentes Pablo Viloria Molinares y Jorge González Coneo.

Referencias

- Azid, S., Sharma, B., Raghuwairi, K., Chand, A., Prasad, S., Jacquier, A., 2015. SMS based flood monitoring and early warning system. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 10, 6387–6391.
- Babín Vich, R., Gómez Ortiz, D., 2010. *Problemas de Geología Estructural* 8. Fallas. Reduca Geol.
- Baghyasree, T., Janakiraman, K., Parkavi, D., 2014. Efficient Remote Video Monitoring for Industrial Environment Based on LPC2148 and GSM. *Indian J. Sci. Technol.* 7, 1333–1341. doi:10.17485/IJST/2014/V7I9/50161
- Baviskar, A., Baviskar, J., Wagh, S., Mulla, A., Dave, P., 2015. Comparative Study of Communication Technologies for Power Optimized Automation Systems: A Review and Implementation, in: 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies. IEEE, pp. 375–380. doi:10.1109/CSNT.2015.144
- Cabeza Pinzon, E., 2009. Análisis del comportamiento geotécnico de oleoductos y gasoductos en deslizamientos de tierra. Universidad Industrial de Santander.
- Cama-Pinto, A., Pineres-Espitia, G.D., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J.G., Sepulveda-Ojeda, J.A., 2016. Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla Colombia. *Ingeniare Rev. Chil. Ing.* 24, In Press.
- Carbonell-Cera, R.A., 2015. Acoplamiento de expansión para tubos variables en longitud.
- Dash, S.R., Jain, S.K., 2007. Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines. IITK-GSDMA Codes.
- El Comercio, 2016. Otras 10 comunidades son declaradas en emergencia por derrame. *El Comer. Perú.*
- Fazzini, P., Otegui, J., Kunert, H., 2009. Predicting failure conditions of SMAW girth welded X70 Pipelines subjected to soil movement. *World Gas Conf.*
- Gagnon, N., Hall, C.A.S., Brinker, L., 2009. A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production. *Energies* 2, 490–503. doi:10.3390/en20300490
- Green Peace, 2012. Impactos ambientales del petróleo.
- Halonen, T., Romero, J. (Romero G., Melero, J.), 2003. GSM, GPRS, and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS. J. Wiley.
- Imad Jawhar, I., Nader Mohamed, N., Khaled Shuaib, K., 2007. A framework for pipeline infrastructure monitoring using wireless sensor networks, in: 2007 Wireless Telecommunications Symposium. IEEE, pp. 1–7. doi:10.1109/WTS.2007.4563333
- Khan, S.R., Nath, R.K., Bhat, M.S., 2014. GSM and GUI Based Remote Data Logging System, in: 2014 Fifth International Symposium on Electronic System Design. IEEE, pp. 29–32. doi:10.1109/ISED.2014.14
- Kuhn, H.S., 1958. Variable length joint with balls and sockets for universal movement. Google Pat.
- Maldonado, D., 2013. Monitoreo y adquisición de datos de una estación meteorológica a través de una Red Gprs.
- Maldonado-Tinizaray, E.F., Espín-Estévez, D.F., 2008. Diseño de un sistema de telemetría basado en transmisores de corriente y tecnología celular GSM para el monitoreo y prevención de fugas en una sección del Poliducto Transecuatoriano.
- Mejía-Granda, R., Quito-Pérez, D., 2013. Diseño e implementación de un módulo de comunicación para el control y monitoreo de un MPS vía GSM.
- Mella Contreras, M., 2013. Revisión de modelos numéricos para predecir el comportamiento de tuberías enterradas ante solicitaciones sísmicas.
- Ortega Castro, J., García Abad, R., 2015. Medición de los niveles de contaminación de CO y CO₂, a través de un sistema electrónico basado en PLC's, para el monitoreo de la calidad del aire en la Universidad Católica de Cuenca, Sede Azogues. *Rev. Interam. Ambiente Tur. - RIAT* 10, 217–224. doi:10.4067/riatvol10iss2pp217-224%0718-235X
- Qurat.ul.Ain, Q. ul., Shah, M., Khan, M., Mahmud, S.A., 2015. Implementation of SCADA for multiple telemetry units while using GSM for communication, in: 2015 International Conference on Emerging Technologies (ICET). IEEE, pp. 1–4. doi:10.1109/ICET.2015.7389224
- Rockwell Automation, 2012. Installation Instructions 45LMS Laser Measurement Sensor.
- Urdaneta, M.A., García, C., Saltaren, R., Contreras, G., Ugarte, R., 2012. Estructura Robótica Pre-Tensada para Robot en Tuberías Petroleras. *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. RIAI* 9, 135–143. doi:10.1016/j.riai.2012.02.001
- Vizueté, A.Z., Llopis, I.P., Salvador, C.P., Domingo, M.E., 2015. Sistema Distribuido de Detección de Sismos Usando una Red de Sensores Inalámbrica para Alerta Temprana. *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. RIAI* 12, 260–269. doi:10.1016/j.riai.2015.06.002