

Identificación de soldaduras anómalas mediante la aplicación del análisis de componentes principales a los datos de densidad de flujo magnético capturados por

Michael C Byington¹, Anouk van Pol¹, John van Pol¹

¹INGU Solutions Inc



Organizado por



Resumen

Las herramientas de inspección en línea flotante (ILI, por sus siglas en inglés) que utilizan mediciones de densidad de flujo magnético (MFD, por sus siglas en inglés) han estado mejorando los programas de integridad de tuberías durante casi una década. Se ha demostrado el uso de mediciones de MFD para inferir información sobre el estado de las paredes de las tuberías y, a medida que se encuentran disponibles más datos de inspección, la capacidad de utilizar mediciones de MFD aumenta continuamente. Este trabajo se enfoca en la identificación de soldaduras anómalas mediante la aplicación del análisis de componentes principales a los datos de densidad de flujo magnético capturados por herramientas ILI de flotación libre. Se explicará el concepto de análisis de componentes principales, cómo se puede aplicar este enfoque a tareas de clasificación no supervisada en general y los resultados del caso de uso específico de identificación de soldaduras anómalas.

Introducción

La demanda mundial de hidrocarburos continúa creciendo, lo que aumenta la presión sobre la infraestructura de tuberías. Los tuberías son el principal modo de transporte de petróleo y gas y atraviesan continentes y océanos para entregar energía a los consumidores. A pesar de su eficiencia, los tuberías son susceptibles a fallas que pueden tener consecuencias de gran alcance. Por ejemplo, en 2016 en América del Norte una falla en un tubería provocó la liberación de 2000 toneladas métricas de hidrocarburos, causando daños ambientales, pérdidas económicas y problemas de seguridad pública [1].

La integridad de los tuberías ha sido un tema de constante investigación y desarrollo tecnológico. Desde la década de los 80, las fugas por flujo magnético (MFL, por sus siglas en inglés) y los dispositivos de ultrasonidos han sido las principales herramientas utilizadas para la gestión de la integridad de los tuberías. Estas herramientas han demostrado ser eficaces para detectar corrosión, grietas y otras formas de daños. Sin embargo, enfrentan limitaciones al inspeccionar tuberías con geometrías complejas, como curvas cerradas, cambios de diámetro o válvulas no circulares [1,2]. Estos desafíos son particularmente graves para los tuberías que no se pueden inspeccionar mediante raspadores, es decir, aquellas que no pueden acomodar herramientas de inspección convencionales. En los Estados Unidos, aproximadamente el 70 % de las tuberías de gas construidas antes de que se desarrollaran las tecnologías modernas de inspección en línea (ILI, por sus siglas en inglés) se consideran no aptas para raspadores, lo que representa hasta el 40 % de las tuberías en servicio en 2012 [3,4].

Abordar los desafíos de los tuberías que no se pueden limpiar con raspadores requiere soluciones innovadoras. Los avances en herramientas de inspección en línea de flotación libre desde principios de la década de 2000 han abierto nuevas vías para el monitoreo de tuberías. Estas herramientas, que funcionan independientemente de la geometría de la tubería, son capaces de detectar fugas [5,6], reconstruir trayectorias de tuberías [7,8] y evaluar las condiciones de las paredes [9,10]. A diferencia

de los dispositivos de raspado tradicionales que requieren contacto continuo con el interior de la tubería, las herramientas de flotación libre navegan por las tuberías de manera autónoma y recopilan datos a medida que avanzan a través de ellas. Esta capacidad les permite operar en tuberías con geometrías complejas, incluidas aquellas con curvas pronunciadas, diámetros variables y características no estándar. Entre sus muchas aplicaciones, el uso de la magnetometría remanente para la inspección de soldaduras es un área de investigación prometedora. Este artículo se centra en la aplicación del análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) a los datos de magnetización remanente, con el fin de demostrar su potencial para identificar soldaduras con firmas magnéticas anómalas y mejorar la gestión de la integridad de las tuberías.

Heterogeneidad del material y los desafíos de la inspección de soldaduras

Debido a que la soldadura es la única parte de la fabricación de tuberías que se realiza en el campo, las soldaduras son menos uniformes que el resto de la tubería de acero. Como tal, son los lugares más comunes donde se producen fallos. Incluso un proceso de soldadura perfectamente ejecutado introduce heterogeneidad en el material, particularmente en la zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) adyacente a la soldadura. Esta zona experimenta cambios térmicos y mecánicos significativos, incluido el engrosamiento del grano, transformaciones de fase y tensiones residuales. La HAZ también es especialmente susceptible al agrietamiento y la corrosión inducidos por tensión, lo que la convierte en un punto de falla común [11]. Además, los defectos de soldadura como la porosidad, la fusión incompleta y las inclusiones de escoria actúan como concentradores de tensión, lo que aumenta aún más el riesgo de falla [12]. La detección de estos defectos es un objetivo clave de la gestión de la integridad de las tuberías.

Si bien los dispositivos tradicionales de MFL han logrado avances significativos en el área de inspección de soldaduras, enfrentan limitaciones en el manejo de tuberías con geometrías complejas. La magnetometría remanente ofrece un enfoque alternativo al analizar las firmas magnéticas residuales dejadas por la soldadura y otros procesos que inducen estrés. Estas firmas proporcionan información valiosa sobre la integridad estructural de las juntas de las tuberías, lo que permite la identificación de posibles defectos.

Análisis de componentes principales: Un marco para la reducción dimensional

El análisis de datos de magnetización remanente genera grandes conjuntos de datos, particularmente para tuberías largas. Por ejemplo, los magnetómetros en herramientas de flotación libre toman muestras a frecuencias de hasta 1000 Hz, generando cientos a miles de puntos de datos por cada firma de soldadura. La gestión e interpretación de dichos datos requiere técnicas efectivas de reducción dimensional.

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) es un método estadístico que transforma datos de alta dimensión en un espacio de menor dimensión preservando la mayor varianza posible. Al realizar una descomposición en valores singulares en datos centrados en la media, PCA identifica un conjunto de vectores propios ortogonales, o "componentes principales", que capturan los patrones más significativos en el conjunto de datos.

En este estudio, estos componentes principales se denominan "eigenjoints", que representan las firmas magnéticas de las uniones de las tuberías. El poder explicativo de cada eigenjoint se cuantifica mediante su valor singular, que proporciona una medida de la varianza explicada por ese componente. Los gráficos de energía acumulada visualizan esta información, ilustrando cómo se distribuye la varianza a lo largo de los eigenjoints (Figura 1).

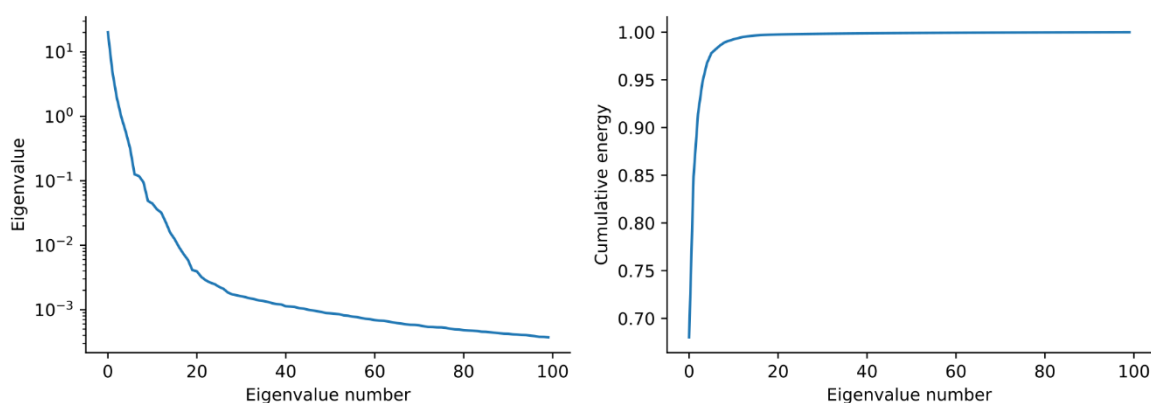


Figura 1. Los gráficos de energía acumulada del análisis de PCA muestran que menos de 20 eigenjoints explican más del 90 % de la varianza de la muestra de esta tubería.

Para la tubería analizada en este estudio, el PCA reveló que el primer eigenjoint capturó el 65 % de la varianza en el conjunto de datos, mientras que los primeros 20 eigenjoints explicaron el 98 % de la varianza. Este resultado resalta la eficacia del PCA para reducir la complejidad de los datos conservando características esenciales.

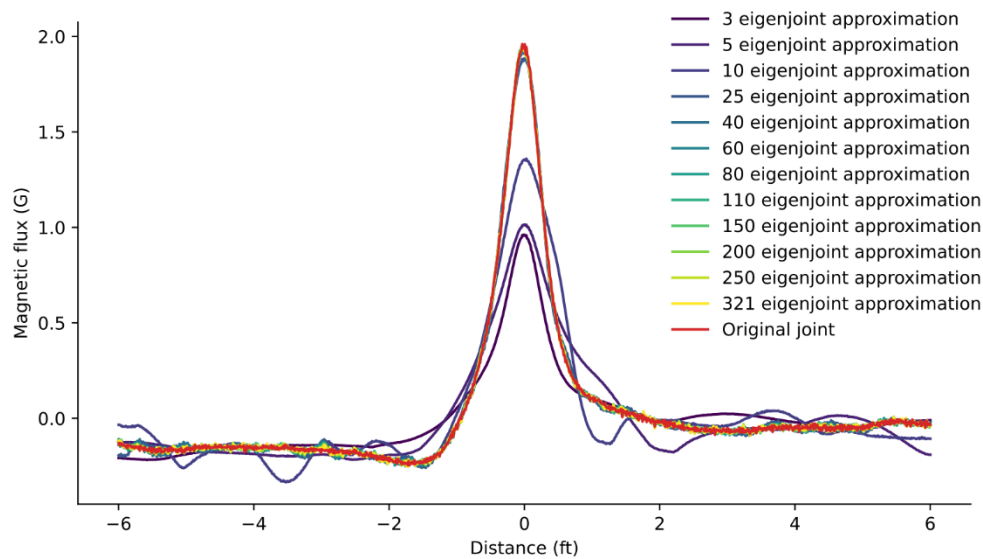


Figura 2. Aquí se muestra una de las juntas típicas de nuestra muestra como una aproximación mediante una combinación lineal de eigenjoints crecientes. Con 25 eigenjoints, la aproximación reproduce todas las características de la firma original.

Al expresar cada junta como una combinación lineal de eigenjoints, es posible clasificar las soldaduras en función de las contribuciones a los diversos eigenjoints. Las juntas atípicas, caracterizadas por firmas magnéticas inusuales, se pueden identificar analizando las desviaciones en las contribuciones de los eigenjoints. En la Figura 2, se muestra un ejemplo de reconstrucción de firma magnética basada en contribuciones de los eigenjoints. Al utilizar una combinación lineal de solo 25 eigenjoints, podemos reconstruir la firma de densidad de flujo magnético en cada soldadura de la tubería.

Resultados

El análisis se centró en un segmento de tubería que contiene 321 juntas. Utilizando PCA, las juntas se categorizaron en función de las contribuciones de eigenjoints. Los valores atípicos se definieron como juntas en las que las contribuciones de los dos primeros eigenjoints superaron dos desviaciones estándar de la media. La separación de las juntas por contribuciones de los eigenjoints se muestra en la Figura 3.

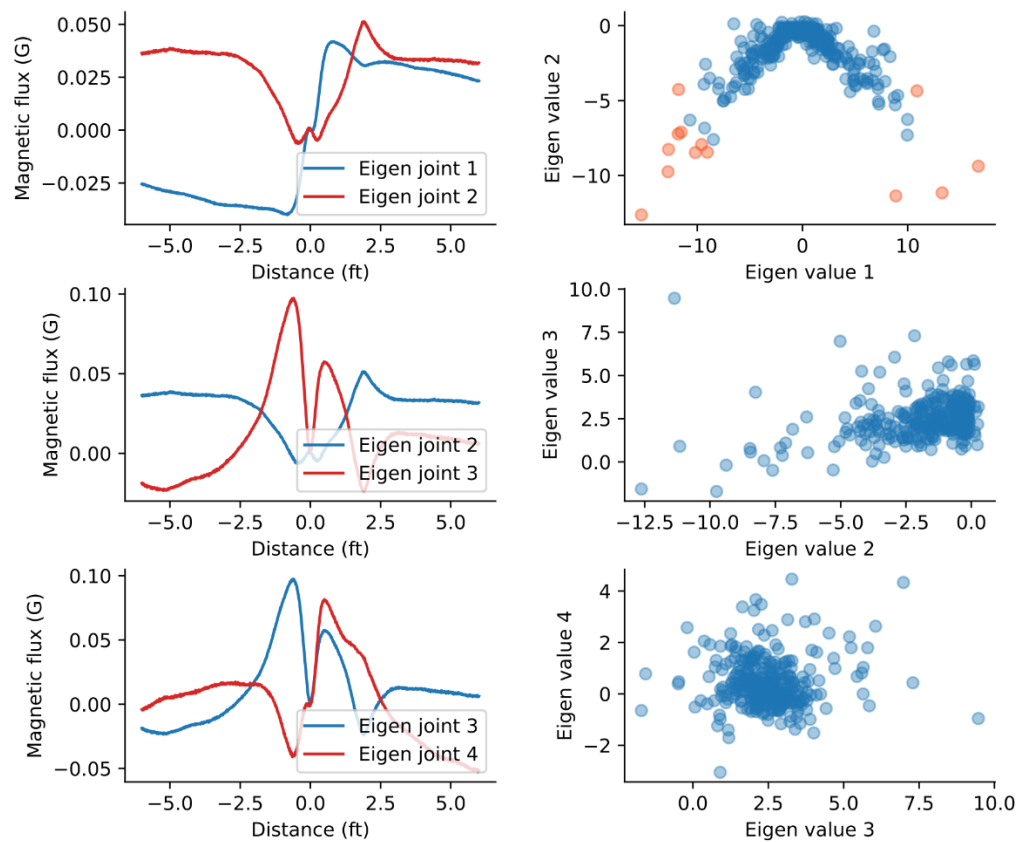


Figura 3. Comparación de las contribuciones de los primeros 4 eigenjoints a cada una de las firmas de las juntas reales en la muestra. Las juntas atípicas se definieron como mayores a dos desviaciones estándar en los eigenjoints 1 y 2. En el gráfico superior derecho, dichas juntas están coloreadas en naranja para indicar valores atípicos.

Las juntas atípicas exhibieron desplazamientos de línea base distintivos, una característica capturada predominantemente por la primera eigenjoint. Este desplazamiento de la línea de base representó el 65 % de la varianza en el conjunto de datos, lo que demuestra el poder del PCA para identificar características clave sin inspección manual. El desplazamiento es la diferencia más llamativa en las juntas de muestra de los grupos normales y atípicos en la Figura 4.

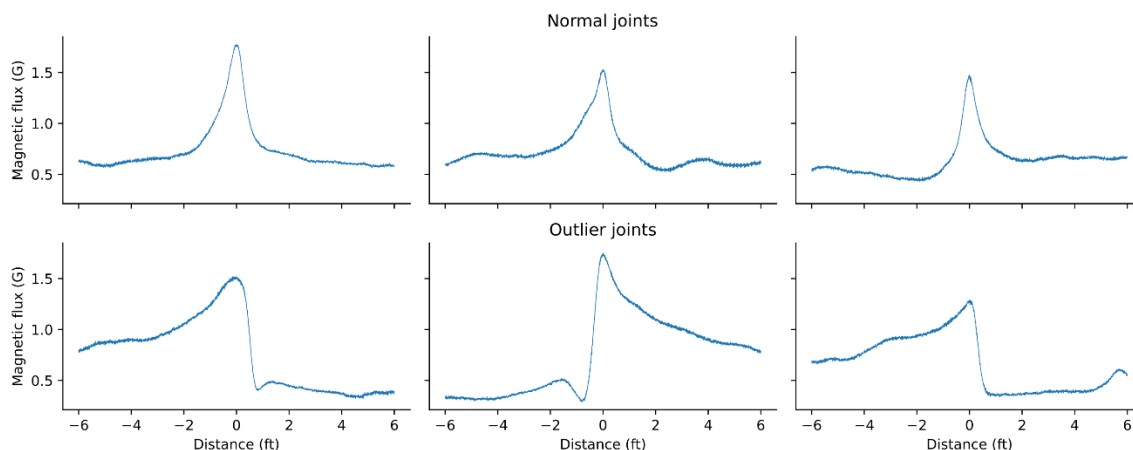


Figura 4. Muestras de juntas de los grupos normales y atípicos. La característica de desplazamiento capturada en eigenjoint 1 (ver Figura 3) es la diferencia más pronunciada entre los dos grupos. Esto es lo esperado ya que eigenjoint 1 es responsable del 65 % de la variación dentro de las firmas conjuntas en esta tubería de ejemplo.

Análisis

La aplicación del PCA a los datos de magnetometría remanente ofrece varias ventajas para la gestión de la integridad de las tuberías:

Capacidad de expansión: El PCA es adecuado para analizar grandes conjuntos de datos, lo que lo hace ideal en caso de tratarse de tuberías siempre que los dispositivos flotantes puedan inspeccionarlos.

Eficiencia: Al reducir la dimensionalidad de los datos, el PCA simplifica la clasificación de las juntas de las tuberías, lo que permite a los inspectores centrarse en las anomalías.

Comprensión más profunda: El PCA cuantifica la variación explicada por características específicas, lo que proporciona una comprensión más profunda de la morfología de las juntas de las tuberías.

Los trabajos futuros explorarán la integración del PCA con algoritmos de aprendizaje automático para automatizar la detección de anomalías. Técnicas como la agrupación en clústeres y la clasificación supervisada tienen el potencial de mejorar la precisión y confiabilidad de la clasificación de juntas. Además, ampliar el conjunto de datos para incluir diversos materiales y configuraciones de tuberías mejorará la generalización de este enfoque.

Conclusión

Este estudio demuestra el potencial del PCA para analizar las firmas magnéticas remanentes de las juntas de tuberías. Al permitir una clasificación y reducción dimensional eficiente, el PCA proporciona una herramienta poderosa para gestionar tuberías que no se pueden limpiar con raspadores y detectar anomalías de soldadura. A medida que el campo de la magnetometría

Pipeline Pigging and Integrity Management Conference (Conferencia sobre raspado de tuberías y gestión de integridad), Houston, enero de 2025

remanente continúa evolucionando, la integración del PCA con análisis avanzados mejorará aún más la gestión de la integridad de las tuberías.

Referencias

- [1] M. Xie, and Z. Tian, "A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data," *Engineering Failure Analysis*, vol. 92, pp. 222–239, 2018.
- [2] F. Varela, M. Yongjun Tan, and M. Forsyth, "An overview of major methods for inspecting and monitoring external corrosion of on-shore transportation pipelines," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 50, pp. 226–235, 2015.
- [3] Interstate Natural Gas Association of America, "Report to the National Transportation Safety Board on Historical and Future Development of Advanced In-Line Inspection Platforms for Use in Gas Transmission Pipelines," 2012.
- [4] J. Tiratsoo, "Ultimate Guide to Unpiggable Pipelines," 2013.
- [5] R. Fletcher, and M. Chandrasekaran, "SmartBall: a new approach in pipeline leak detection," *International Pipeline Conference*, vol. 48586, pp. 117–133, 2008.
- [6] J. Smith, A. Van Pol, D. Ham, and J. Van Pol, "Leak detection and prevention using free-floating in-line sensors," *Pipeline Pigging and Integrity Management*, 2019.
- [7] A. Van Pol, J. Van Pol, R. McNealy, and C. Goudy, "The Future of In-Line Inspection: Free-Floating Smart Sensors," *International Pipeline Conference*, vol. 51869, pp. V001T03A021, 2018.
- [8] M. Volk, S. Miska, and E. Freeman, "Miniature Sensors for Monitoring the Operational Conditions of Pipelines," *Offshore Technology Conference*, pp. OTC–23186, 2012.
- [9] X. Du, X. Fang, W. Tian, P. Tang, and C. Miao, "Design of A Free Floating Ultrasonic Inner Spherical Detector for Pressure Pipeline," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1948, pp. 012092, 2021.
- [10] M. Kindree, S. Campbell, A. Van Pol, and J. Val Pol, "Defect localization using free-floating unconventional ILL-tools without AGMs," *Pipeline Pigging and Integrity Management*, 2022.
- [11] M. Satyadev, P. Udatha, R. Damodaram, S. Nagireddy, and L. R. Bhagavathi, "Characterization of SA333 and SA53 steel pipe weld joints," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2395, 2021.
- [12] A. Dubov, "A rapid method of inspecting welded joints utilising the magnetic memory of metal," *Welding International*, vol. 11, pp. 410–413, 1997.