

Identificação de soldas anômalas pela aplicação da análise de componentes principais aos dados de densidade de fluxo magnético capturados por uma ferramenta de ILI do tipo flutuante

Michael C Byington¹, Anouk van Pol¹, John van Pol¹

¹INGU Solutions Inc



Organizado por



Anais da Conferência de 2025 - Pipeline Pigging and Integrity Management Conference (Conferência sobre Pigging de Dutos e Gestão de Integridade).

Copyright © 2025 por Clarion Technical Conferences e autor(es).

Todos os direitos reservados. Este documento não deve ser reproduzido de forma alguma sem a permissão dos detentores dos direitos autorais.

Resumo

Ferramentas de inspeção em linha (ILI) que usam medições de densidade de fluxo magnético (MFD) vêm aprimorando os programas de integridade de tubulação há quase uma década. O uso de medições MFD para inferir informações da condição da parede da tubulação já foi demonstrado e, com mais dados de inspeção disponíveis, a capacidade de usar medição MFD está crescendo continuamente. Este trabalho foca na identificação de soldas anômalas pela aplicação da análise de componentes principais aos dados de densidade de fluxo magnético capturados por uma ferramenta de ILI do tipo flutuante. O conceito da análise de componentes principais, como essa abordagem pode ser aplicada a tarefas de classificação sem supervisão em geral, e os resultados do uso específico para identificação de soldas anômalas serão explicados.

Introdução

A demanda mundial por hidrocarbonetos continua a crescer, aumentando de forma crescente a pressão sobre a infraestrutura de tubulações. As tubulações são o principal modo de transporte para óleo e gás, atravessando continentes e oceanos para entregar energia aos consumidores. Apesar de sua eficiência, as tubulações são suscetíveis a falhas, o que pode levar a consequências de grande alcance. Em 2016, por exemplo, uma falha de tubulação na América do Norte resultou na liberação de 2.000 toneladas métricas de hidrocarbonetos, levando a danos ambientais, perdas econômicas e preocupações com a segurança pública [1].

A integridade das tubulações tem sido objeto de pesquisas em andamento e desenvolvimento tecnológico. Ferramentas de inspeção tradicionais, como o ensaio magnetic flux leakage (MFL) (vazamento de fluxo magnético) e dispositivos de ultrassom foram as principais ferramentas utilizadas para a gestão da integridade de tubulações desde os anos 1980. Essas ferramentas demonstraram ser eficazes em detectar corrosões, fissuras e outras formas de dano. No entanto, elas possuem limitações ao inspecionar tubulações com geometrias complexas, como em curvas acentuadas, alterações de diâmetro ou válvulas não circulares [1,2]. Esses desafios são particularmente críticos para tubulações "não pigáveis" – que não acomodam ferramentas de inspeção convencionais. Nos Estados Unidos, cerca de 70% dos gasodutos construídos antes que as tecnologias de inspeção em linha (ILI) modernas fossem desenvolvidas são considerados não pigáveis, representando até 40% das tubulações em operação em 2012 [3,4].

Abordar os desafios de tubulações não pigáveis requer soluções inovadoras. Avanços nas ferramentas de inspeção em linha do tipo flutuante desde o início dos anos 2000 expandiram os horizontes para o monitoramento de tubulações. Essas ferramentas, que operam independente da geometria da tubulação, conseguem detectar vazamentos [5,6], reconstruir trajetos de tubulações [7,8] e avaliar as condições da parede [9,10]. Diferente dos dispositivos de pigagem que requerem contato contínuo com o interior da tubulação, as ferramentas do tipo flutuante exploram as tubulações de forma autônoma, coletando dados conforme se movem pelo duto. Isso permite que elas operem em

tubulações com geometrias complexas, incluindo aquelas com curvas acentuadas, variação de diâmetro e características fora do padrão. Entre suas muitas aplicações, o uso de magnetometria remanescente para inspeção de soldas é uma área de pesquisa promissora. Este artigo foca na aplicação da análise de componentes principais (PCA) a dados de magnetização remanescente, demonstrando seu potencial em identificar soldas com assinaturas magnéticas anômalas e melhorar a gestão de integridade da tubulação.

Heterogeneidade de material e os desafios da inspeção de soldas

Como a soldagem é a única parte da fabricação de tubulações que ocorre em campo, as soldas são menos consistentes que o restante do tubo de aço. Dessa forma, acabam sendo os locais mais comuns de falhas. Mesmo um processo de soldagem perfeitamente executado introduz heterogeneidade no material, particularmente na zona afetada pelo calor (ZAC) adjacente à solda. Essa zona sofre alterações térmicas e mecânicas significativas, incluindo crescimento de grão, transformações de fases e tensões residuais. A ZAC também é particularmente suscetível a fissuras e corrosões induzidas por tensão, tornando-a um ponto comum de falha [11]. Além disso, defeitos da solda, como porosidade, fusão incompleta e inclusões de escória agem como concentradores de tensão, aumentando ainda mais o risco de falha [12]. Detectar esses defeitos é um objetivo chave na gestão de integridade de tubulações.

Embora dispositivos tradicionais de MFL tenham feito avanços significativos na área de inspeção de soldas, eles enfrentam limitações ao lidar com tubulações de geometrias complexas. A magnetometria remanescente oferece uma abordagem alternativa ao analisar características de magnetização residual deixadas pela soldagem e outros processos causadores de tensão. Essas características fornecem insights valiosos sobre a integridade estrutural das juntas de tubulações, permitindo a identificação de potenciais defeitos.

Análise de componentes principais: Uma estrutura para redução dimensional

A análise de dados de magnetização remanescente gera conjuntos de dados extensos, particularmente para tubulações longas. Por exemplo, magnetômetros em ferramentas do tipo flutuantes amostram em frequências de até 1000 Hz, gerando centenas de milhares de pontos de dados por assinatura de solda. Gerenciar e interpretar tantos dados requer técnicas de redução dimensional eficazes.

A análise de componentes principais (PCA) é um método estatístico que transforma dados de alta dimensão em um espaço de menor dimensão, preservando o máximo de variância possível. Ao desempenhar uma decomposição por valor singular nos dados centrados na média, a PCA identifica um conjunto de *eigenvectors* ortogonais, ou "componentes principais", que captura os padrões mais significativos no conjunto de dados.

Neste estudo, esses componentes principais são chamados de "eigenjoints" (juntas características), representando as assinaturas magnéticas das juntas da tubulação. O poder explicativo de cada *eigenjoint* é quantificado por seu valor singular, o que fornece uma medida de variância explicada por aquele componente. Gráficos de energia cumulativa são utilizados para visualizar essa informação, ilustrando como a variância é distribuída pelas *eigenjoints* (Figura 1).

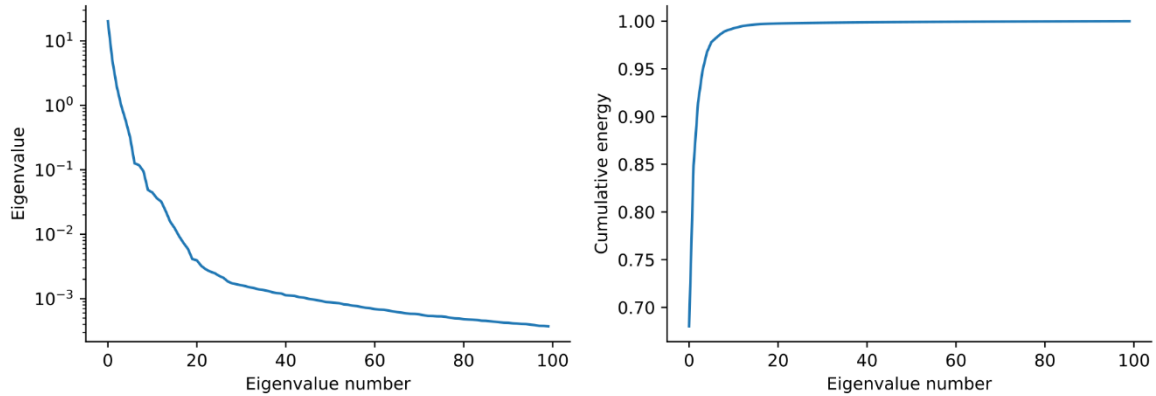


Figura 1. Gráficos de energia cumulativa de análise PCA mostram que menos de 20 *eigenjoints* explicam mais de 90% da variância da amostra dessa tubulação.

Para a tubulação analisada neste estudo, a PCA revelou que a primeira *eigenjoint* capturou 65% da variância no conjunto de dados, enquanto as primeiras 20 *eigenjoints* explicaram 98% da variância. A descoberta destaca a eficácia da PCA em reduzir a complexidade de dados enquanto retém características essenciais.

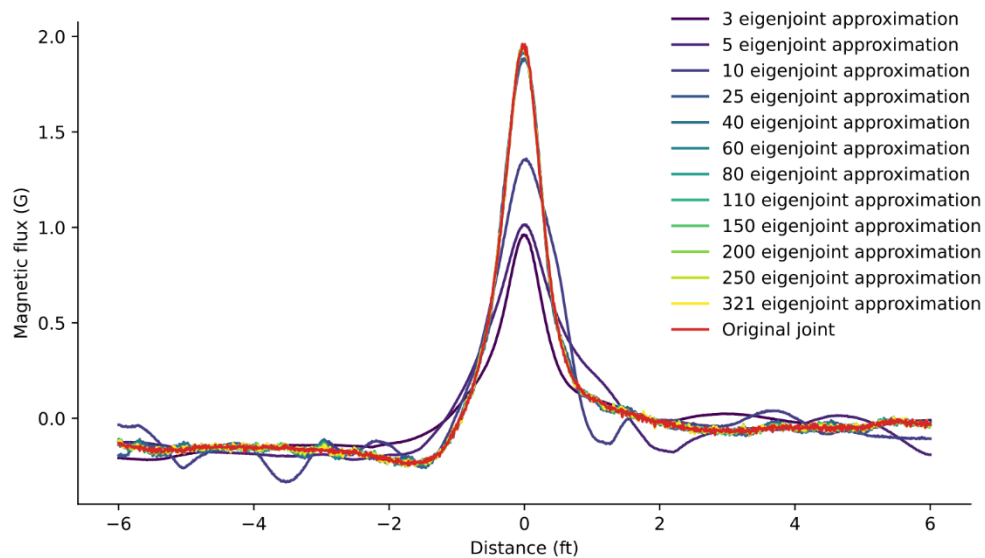


Figura 2. Uma das juntas típicas em nossa amostra é mostrada aqui como uma aproximação por combinação linear de *eigenjoints* progressivas. Com 25 *eigenjoints*, a aproximação reproduz todas as características da assinatura original.

Ao expressar cada junta como uma combinação linear de *eigenjoints*, torna-se possível classificar soldas com base nas contribuições de inúmeras *eigenjoints*. Soldas atípicas, caracterizadas por assinaturas magnéticas incomuns, podem ser identificadas ao analisar desvios das contribuições de *eigenjoints*. Um exemplo de reconstrução de assinatura magnética com base em contribuições de *eigenjoint* é apresentado em **Figura 2**. Ao utilizar uma combinação linear de apenas 25 *eigenjoints*, podemos reconstruir a assinatura de densidade de fluxo magnético em cada solda da tubulação.

Resultados

A análise focou no segmento de tubulação que contém 321 juntas. Usando PCA, as juntas foram caracterizadas com base nas suas contribuições de *eigenjoint*. As juntas atípicas foram definidas como aquelas nas quais as contribuições das primeiras *eigenjoints* excederam duas vezes o desvio padrão em relação à média. A separação de juntas por contribuições de *eigenjoint* é apresentada na **Figura 3**.

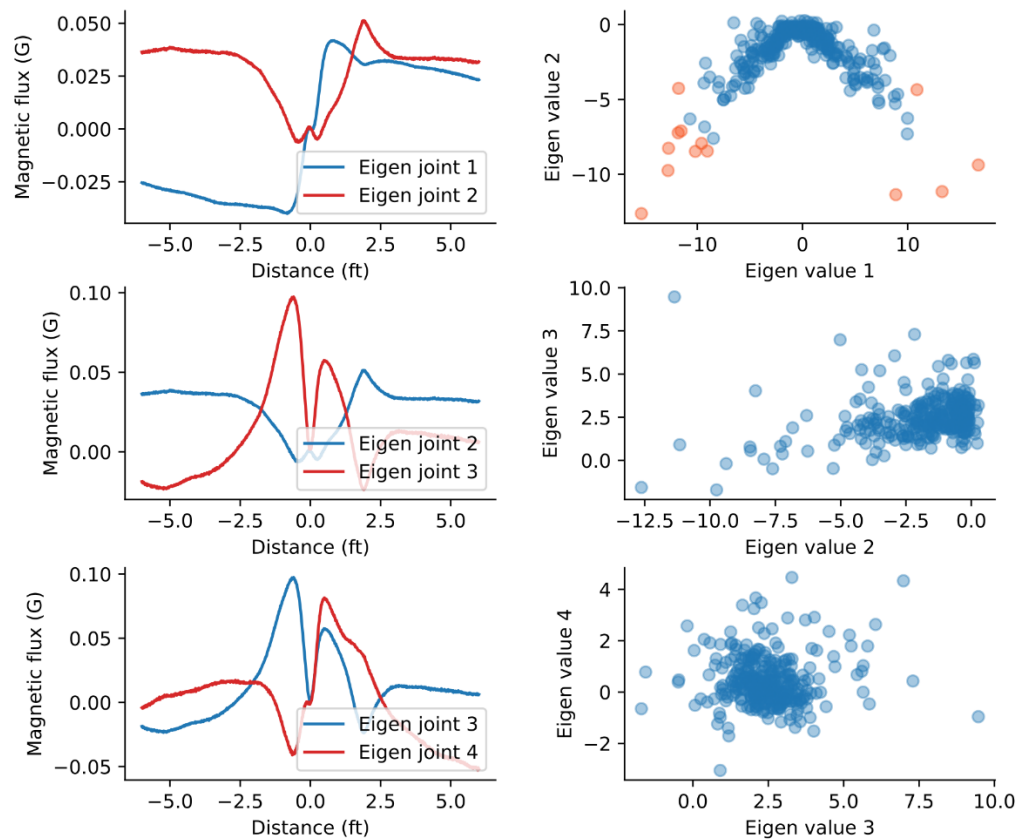


Figura 3. Comparação de contribuições das primeiras 4 *eigenjoints* para cada uma das assinaturas reais de juntas na amostra. Juntas atípicas foram definidas como as com desvio padrão duas vezes

maior nas *eigenjoints* 1 e 2. No gráfico superior direito, essas juntas estão coloridas de laranja para indicar valores atípicos.

Juntas atípicas exibiram deslocamentos característicos da linha de base, uma característica capturada pela primeira *eigenjoint*. Esse deslocamento da linha de base representou 65% da variância no conjunto de dados, demonstrando o poder da PCA em identificar características chave sem inspeção manual. Esse deslocamento é a diferença mais marcante nas juntas amostradas dos grupos normal e atípico na **Figura 4**.

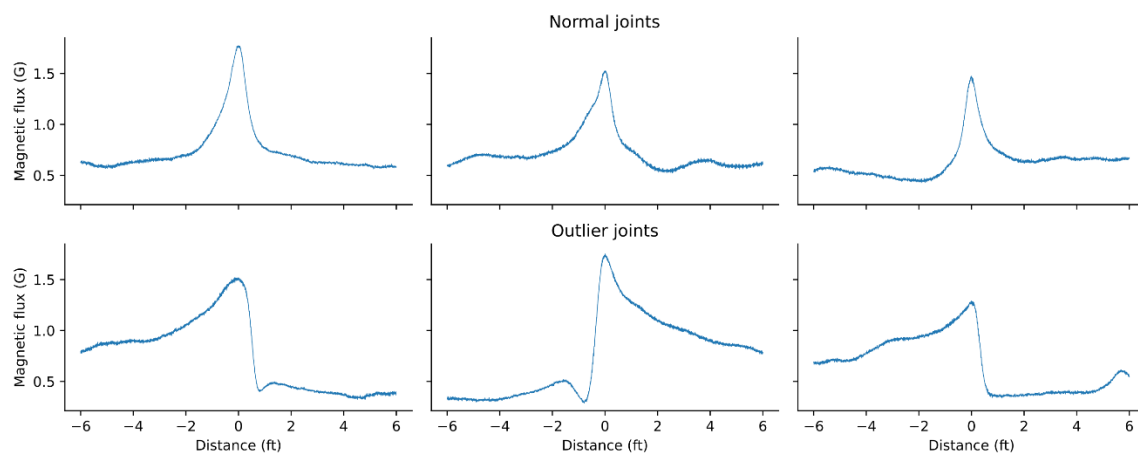


Figura 4. Juntas amostradas dos grupos normal e atípico. O deslocamento capturado na *eigenjoint* 1 (ver **Figura 3**) é a diferença mais pronunciada entre os dois grupos. Isso era esperado, pois a *eigenjoint* 1 é responsável por 65% da variância dentro das assinaturas de junta nessa tubulação de exemplo.

Discussão

A aplicação de PCA para dados de magnetometria remanescente oferece muitas vantagens para a gestão de integridade de tubulações:

Escalabilidade: A PCA é apropriada para análise de grandes conjuntos de dados, tornando-a ideal para tubulações que podem ser inspecionadas por dispositivos do tipo flutuantes.

Eficiência: Ao reduzir a dimensionalidade dos dados, a PCA simplifica a classificação das juntas de tubulações, permitindo que os inspetores foquem nas anomalias.

Insight: A PCA quantifica a variância explicada por características específicas, fornecendo um entendimento mais aprofundado da morfologia da junta da tubulação.

Trabalhos futuros explorarão a integração de PCA com algoritmos de aprendizado por máquina para automatizar a detecção de anomalias. Técnicas como agrupamento e classificação supervisionada têm potencial para melhorar a acurácia e confiabilidade da classificação de juntas. Além disso, expandir o conjunto de dados para incluir diversos materiais e configurações de tubulações melhorará a generalizabilidade dessa abordagem.

Conclusão

Este estudo demonstra o potencial da PCA em analisar assinaturas magnéticas remanescentes de juntas de tubulações. Ao permitir uma redução e classificação dimensional eficiente, a PCA fornece uma ferramenta poderosa para gerenciar tubulações não pigáveis e detectar anomalias nas soldas. Como o campo da magnetometria remanescente continua a evoluir, a integração de PCA com análises avançadas melhorará ainda mais a gestão da integridade da tubulação.

Referências

- [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.