

INTEGRACIÓN DE MÚLTIPLES CARRERAS ILI

Esteban Cáceres, Aconcagua Ingeniería, esteban.caceres@aconcaguaingenieria.com; Mayra Lagarde, Aconcagua Ingeniería, mayra.lagarde@aconcaguaingenieria.com; Luciano Carlini, Aconcagua Ingeniería, Luciano.carlini@aconcaguaingenieria.com

1. Sinopsis

En el ámbito de la integridad de ductos, la integración de múltiples inspecciones internas ILI (In-Line Inspection) emerge como un proceso clave para evaluar y proyectar el estado de integridad de los ductos a lo largo del tiempo. La complejidad en el emparejamiento de indicaciones aumenta cuando las inspecciones involucran tecnologías y proveedores diversos, dificultando la correlación de datos especialmente en ductos con varios años de operación.

Para agilizar el emparejamiento de anomalías, se desarrolló una aplicación en VBA (Visual Basic for Application) ejecutada en Microsoft Excel. Esta herramienta permite ingresar parámetros relacionados con el formato de datos y las herramientas utilizadas en cada inspección, facilitando el emparejamiento automático de indicaciones entre dos o más inspecciones consecutivas.

La automatización ofrece ventajas significativas, eliminando errores humanos y acelerando la generación de informes.

Por un lado, la correlación de resultados de inspección de dos tipos de herramientas diferentes permite evaluar la interacción de distintos mecanismos de daño sobre el ducto bajo estudio.

Adicionalmente, el emparejamiento de inspecciones consecutivas permite evaluar el avance de los mecanismos de daño dependientes del tiempo. En este sentido, nos enfocamos en las amenazas de corrosión interna y corrosión externa, emparejando las indicaciones de pérdida de metal en la pared interna y externa del ducto respectivamente. El cálculo de la tasa de corrosión implica calcular la diferencia de profundidades entre indicaciones emparejadas, considerando linealidad en la tasa de corrosión. La aplicación realiza un análisis estadístico conjunto de las velocidades de corrosión, aportando una visión completa para evaluar la integridad del ducto.

Las anomalías emparejadas se representan como variables aleatorias normales, permitiendo estimar velocidades de corrosión tanto interna como externa. Luego, siguiendo las indicaciones de la normativa DNVGL-RP-F101, proyectamos el crecimiento de todas las anomalías utilizando la tasa de corrosión estimada que proporcione un nivel de certeza del 95% para el periodo evaluado.

Este enfoque no solo optimiza los tiempos de emparejamiento de indicaciones, sino que también mejora la fiabilidad de las proyecciones, cumpliendo con estándares reconocidos en la industria. La aplicación se presenta como una herramienta valiosa para la gestión efectiva de la integridad de ductos en entornos donde se ven involucradas múltiples inspecciones y tecnologías.

2. Introducción

Los oleoductos y gasoductos representan una parte crucial de la infraestructura destinada al transporte eficiente de hidrocarburos, desde los puntos de producción hasta los consumidores finales. La integridad de estos sistemas se ve constantemente desafiada por amenazas, siendo la corrosión una de las más comunes y significativas. Este fenómeno, un proceso dependiente del tiempo que gradualmente reduce el espesor de las paredes de estos ductos, puede desencadenar fallas como fugas y roturas, con consecuencias que van desde pequeñas hasta catastróficas para la sociedad, el medio ambiente y la economía.

Gestionar la integridad de los ductos a lo largo de su vida útil es una tarea primordial para evitar interrupciones en el servicio y posibles pérdidas. Las inspecciones internas (ILI) son utilizadas como un método no destructivo de evaluación de integridad de ductos para detectar y dimensionar, entre otras cosas, anomalías de pérdida de metal.

Si además quisiéramos analizar la tasa de crecimiento de anomalías de pérdida de metal para estimar la vida remanente del ducto (con respecto a corrosión) es necesario emparejar las anomalías de al menos dos inspecciones ILI consecutivas.

El emparejamiento consiste en reconocer la misma anomalía en dos inspecciones distintas realizadas sobre el mismo ducto para evaluar la evolución de cada una de ellas. Esta tarea podría realizarse de dos maneras: utilizando la información de las señales crudas de las herramientas ILI; o utilizando las características de las anomalías ya identificadas y dimensionadas por el ejecutor de las inspecciones. Este trabajo se centra en la segunda opción por varias razones fundamentales.

En primer lugar, el análisis de las señales crudas de las herramientas ILI requiere un conocimiento específico donde el cambio de una herramienta ILI a otra puede dificultar, e incluso imposibilitar, la comparación directa de estas señales. Este enfoque requeriría que el especialista en integridad tenga también un alto grado de pericia en análisis de señales, además de requerir los software correspondientes para cada proveedor de las inspecciones.

En segunda instancia, el emparejamiento de anomalías basado en las características dimensionadas puede realizarse de forma independiente del proveedor de la inspección ILI, lo que resulta útil si se han utilizado diferentes proveedores a lo largo del tiempo para inspeccionar el ducto.

El documento entregado por el ejecutor de las inspecciones es una tabla de datos, normalmente en formatos estándar como documentos CSV (Comma-Separated Values) u hojas de cálculo, llamada habitualmente “pipetally”.

El emparejamiento de anomalías utilizando los pipetally suele realizarse de manera manual, siendo un proceso intensivo en tiempo y propenso a errores. El objetivo de este trabajo es presentar una herramienta digital para el emparejamiento automatizado de anomalías de pérdida de metal, que reemplace el proceso manual de manera más confiable y eficiente en términos de tiempo. Esta herramienta transforma el problema general de emparejar características de varias inspecciones ILI en múltiples instancias de un problema de emparejamiento de puntos en un plano 2D. La aplicación de un modelo probabilístico de emparejamiento de puntos es fundamental para identificar tanto las anomalías coincidentes como los valores atípicos, es decir, aquellas anomalías que no pueden emparejarse.

Una vez realizado el emparejamiento, el ingeniero de integridad puede tomar diferentes enfoques para determinar la velocidad de corrosión general del ducto tanto para las anomalías internas como para las anomalías externas. La recomendada por la normativa DNVGL-RP-F101 es la de considerar aquella velocidad que nos resulte en una certeza del 95%. Para lograr esto debemos trabajar estadísticamente con los valores calculados a partir de las anomalías emparejadas, obteniendo finalmente una velocidad de pérdida de metal general para las anomalías internas y otra para las externas.

A partir de estas velocidades, el ingeniero de integridad podrá estimar el estado del ducto a diferentes momentos futuros, o indicar el tiempo hasta falla.

En las próximas páginas desarrollaremos el proyecto, abordando los distintos obstáculos superados, la propuesta de solución acompañada de su análisis estadístico, un ejemplo de aplicación y el tratamiento estadístico final.

3. Desarrollo

3.1. Inspecciones Internas

Las Inspecciones Internas ILI son una metodología esencial en la evaluación de la integridad de los ductos de hidrocarburos. En estas inspecciones se utilizan herramientas especializadas que se introducen en el interior del ducto para capturar datos sobre su geometría, espesor de pared y anomalías tanto internas como externas. Las tecnologías empleadas pueden incluir sensores magnéticos, ultrasónicos y de corriente inducida, entre otros.

La importancia de las herramientas de inspección interna radica en su capacidad para obtener datos precisos que permiten identificar y dimensionar los defectos causados por diversas amenazas, como pérdidas de metal, grietas o deformaciones. Al identificar estas anomalías, las operadoras pueden tomar decisiones sobre mantenimiento y reparaciones, evitando posibles incidentes y minimizando los impactos negativos.

La norma SP0102, "Inline Inspection of Pipelines", desarrollada por NACE (National Association of Corrosion Engineers), establece prácticas estándar para la implementación de programas de inspección en línea en sistemas de transporte de tuberías. Esta norma cubre aspectos como la selección de herramientas, la evaluación de la compatibilidad de la inspección, las directrices logísticas, la planificación y el análisis de datos, proporcionando una orientación integral sobre cómo desarrollar e implementar un programa de inspecciones efectivo.

Antes de utilizar la información que proporcionan estas herramientas, es imprescindible validar las inspecciones para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos. La normativa STD1163, "In-line Inspection Systems Qualification", desarrollada por API (American Petroleum Institute), establece directrices para llevar a cabo esta validación, asegurando que los resultados de las carreras ILI sean precisos y confiables.

3.2. Análisis de Errores de Medición en Inspecciones ILI

Los errores en el posicionamiento y dimensionamiento de las indicaciones de pérdida de metal pueden tener un impacto significativo en la precisión de la evaluación de integridad de los ductos. En este sentido, es crucial comprender los errores de medición asociados con las inspecciones ILI y los umbrales que los delimitan.

Estos errores y umbrales incluyen:

- **Umbrales de detección, medición y reporte:** Los sensores de la herramienta ILI tienen límites en su capacidad para detectar y medir características, determinados por los umbrales de detección y medición. Además, se establece un umbral de reporte para informar solo las características detectadas por encima de una cierta dimensión.
- **Errores de medición:** Los instrumentos tienen rangos de error diferentes para dimensionar diferentes tipos de anomalías en términos de longitud, ancho y profundidad.
- **Error de detección:** Si el tamaño de la anomalía está por encima del umbral de detección, existe una probabilidad de detección o POD (Probability Of Detection) de dicha anomalía, que describe las capacidades de detección de la herramienta de inspección ILI.
- **Falsas detecciones:** Existe la posibilidad de que la herramienta de inspección ILI informe indicaciones falsas, es decir, anomalías que en realidad no existen. Esto se cuantifica mediante la probabilidad de falsas detecciones o POFC (Probability Of False Calls).
- **Error de ubicación:** Las ubicaciones de las anomalías informadas por distintas inspecciones ILI pueden no estar perfectamente alineadas debido a variaciones en las mediciones de las ruedas odométricas (ubicación longitudinal), errores en la posición horaria (ubicación circunferencial) de las indicaciones y al crecimiento no uniforme de las anomalías entre períodos de inspección.

Estos errores y umbrales pueden dar lugar a anomalías informadas que no tienen un homólogo en la siguiente inspección ILI. Para aquellas anomalías que sí lo tienen, es esencial tener en cuenta los errores mencionados al realizar el análisis de integridad de los ductos.

3.2.1. Errores de posicionamiento

Cada inspección ILI emplea un sistema de coordenadas propio para referenciar la ubicación de las anomalías detectadas. Estas coordenadas se ajustan al inicio de la inspección en un punto conocido; pero a lo largo del recorrido, las discrepancias entre posiciones de diferentes inspecciones aumentan debido a los errores de medición de las ruedas odométricas, encargadas

de registrar el avance de la herramienta a lo largo del ducto. Esta variación en los sistemas de coordenadas entre diferentes inspecciones ILI puede ocasionar desalineaciones en las posiciones de las indicaciones detectadas, dificultando así la comparación entre las mediciones de dos o más inspecciones.

Para minimizar este error, se emplea una técnica que consiste en identificar elementos conocidos y fácilmente ubicables en diversas inspecciones ILI, como lo son las soldaduras circunferenciales. De esta manera, se evita la acumulación progresiva de errores referenciando la ubicación longitudinal de las anomalías a estas indicaciones conocidas, limitándolo únicamente al error entre la posición de dos soldaduras contiguas conocidas.

Además de la incertidumbre en la posición a lo largo de la traza del ducto, se presenta un error en la posición horaria o circunferencial, que es característica de cada herramienta y a la cual no se le aplican medidas adicionales para disminuir su incertidumbre, debido a que esta permanece constante a lo largo de toda la traza recorrida.

Estos errores suelen estar tipificados como rangos de medida en unidades de longitud (mm o pulgadas) para la posición longitudinal y en unidades de grados o minutos para la posición horaria. Es importante tener en cuenta que toda medición posee un margen de error, asociado a un nivel de certeza específico, ya que se trata de una variable aleatoria con un valor medio y una distribución asociada.

En la mayoría de las mediciones, se considera que la distribución normal es la que mejor describe el comportamiento estadístico de las mismas. Cuando se menciona un rango de error sin especificaciones adicionales, se lo suele asociar con un nivel de certeza del 95%.

3.2.2. Errores de profundidad

Las inspecciones ILI se basan en diferentes principios de medición, como MFL (Fuga de Flujo Magnético), UT (Ultrasonido) y EC (Corrientes de Foucault). Cada una de estas tecnologías tiene sus propios rangos de precisión y limitaciones, lo que puede generar variaciones en la profundidad de las indicaciones detectadas entre diferentes inspecciones.

Aun utilizando la misma tecnología, es probable que los errores de medición de profundidad entre las inspecciones analizadas sean diferentes por el simple hecho de utilizar herramientas distintas.

3.3. Emparejamiento de Indicaciones

El emparejamiento de anomalías, esencial para evaluar la integridad de los ductos a lo largo del tiempo, consiste en comparar y correlacionar datos de inspecciones realizadas en momentos diferentes, con el fin de identificar anomalías recurrentes y evaluar los cambios en la condición del ducto. Este proceso implica recopilar datos detallados de las carreras ILI y preprocesarlos para asegurar su comparabilidad, seguido de la alineación de los datos para buscar coincidencias entre las anomalías detectadas en ambas inspecciones. Una vez emparejadas, se evalúan las diferencias en tamaño, forma, ubicación o severidad para comprender la evolución de los defectos y tomar decisiones sobre mantenimiento y gestión de riesgos.

El emparejamiento se puede realizar de forma manual, siendo éste un proceso lento, ineficiente y propenso a errores. Actualmente, las herramientas informáticas agilizan este proceso, resolviendo los emparejamientos en minutos y eliminando el error humano.

Para el caso específico de este estudio, se analizarán las anomalías de pérdida de metal con el objetivo de determinar sus dimensiones en diferentes inspecciones, y así poder estimar sus condiciones futuras.

3.4. Dificultades y Requerimientos

La principal dificultad encontrada en el emparejamiento de indicaciones entre diferentes inspecciones es el gran volumen de información con la que nos enfrentamos. No son extraños los casos en los que tengamos que analizar ductos de decenas de kilómetros e incluso de más de una

centena. Por otro lado, los ductos más antiguos son los más propensos a tener una gran cantidad de indicaciones, llegando a miles de indicaciones por inspección. Si sumamos que esto lo tenemos por dos (dos inspecciones a emparejar), la cantidad de información a procesar es significativa.

A la gran cantidad de información a procesar tenemos que añadirle que los datos se encuentran en hojas de cálculo, y que habría que emparejar las anomalías a criterio, realizando varias combinaciones para asegurarnos de que estamos emparejando de la mejor manera posible dentro de cada área de análisis, que en este caso sería entre dos soldaduras contiguas.

Si bien esto sería lo correcto, no es lo que en la práctica se lleva a cabo habitualmente debido a que implicaría un tiempo de ejecución demasiado extenso para esta tarea. Por lo cual, el emparejamiento se basa principalmente en el criterio del personal a cargo de esta tarea, donde habitualmente no se toman en cuenta los errores aleatorios ni sistemáticos de las herramientas, quedando expuestos a cometer errores significativos.

Lo que normalmente se realiza para minimizar los tiempos de ejecución de dicha tarea es emparejar sólo las indicaciones más severas. Esto agrega un sesgo a la hora de calcular una velocidad de pérdida de metal ya que no estamos tomando en cuenta la totalidad de las indicaciones que podrían ser emparejadas.

Es decir, tenemos tiempos extensos para realizar esta tarea con el agregado del error humano, o si el caso es el de sólo emparejar algunas indicaciones, estaríamos sesgando nuestro análisis obteniendo un resultado menos certero con la realidad del tramo a analizar y, de todas formas, no eliminaríamos el error humano asociado.

3.5. Propuesta de Solución

En esta sección se presenta la metodología propuesta para el emparejamiento de indicaciones de inspecciones ILI, abordando los diversos desafíos asociados con la precisión y fiabilidad del análisis de integridad de ductos. La solución propuesta se desglosa en varios componentes clave, cada uno contribuyendo a la mejora del proceso global.

3.5.1. Recopilación de datos

Aunque la recopilación de datos parece no estar directamente relacionada con el proceso de emparejamiento, es una etapa previa al análisis que impacta significativamente en la precisión de los resultados. Este proceso es importante para identificar zonas donde se han realizado reparaciones, cambios de traza, reemplazos de tubos o eventos específicos que deben ser considerados durante el emparejamiento. Ignorar esta etapa podría llevar a errores debido a la falta de información completa y precisa.

En primer lugar, se recopilan datos detallados de cada corrida ILI, que incluyen la geometría del ducto, el espesor de la pared y características de las anomalías detectadas, así como detalles sobre la herramienta empleada, entre otros. Sin embargo, para obtener una imagen completa de la integridad del ducto, es necesario considerar otra información relevante.

Una pieza clave es el historial de fallas y reparaciones del ducto, que proporciona contexto sobre eventos pasados, como incidentes o intervenciones de mantenimiento, que podrían haber afectado su integridad.

Conocer el historial de fallas y reparaciones permite evaluar si los cambios observados en las carreras ILI son consistentes con los eventos anteriores o si se están produciendo nuevos eventos.

Además, es fundamental tener en cuenta otros estudios relacionados con la integridad del ducto para realizar una comparación exhaustiva de los datos. Estos estudios abarcan evaluaciones de corrosión, análisis de fatiga, inspecciones visuales, pruebas de presión y otros métodos utilizados para monitorear su condición.

Al combinar los hallazgos de estos estudios con los datos de las carreras ILI, se obtiene una visión más completa y precisa de la integridad del ducto. Esta integración de información permite

identificar correlaciones significativas o posibles discrepancias entre los resultados de diferentes fuentes, lo que contribuye a una evaluación rigurosa y confiable de su condición.

Considerar toda esta información proporciona una imagen más completa y precisa de la evolución de la integridad del ducto y facilita la toma de decisiones para asegurar la integridad de nuestro ducto.

3.5.2. Alineación de soldaduras

La primera tarea a realizar antes de comenzar con el emparejamiento de indicaciones es identificar las soldaduras en las diferentes inspecciones y alinearlas. De esta forma, podremos analizar pequeños tramos de ducto con errores en la posición longitudinal menores a los existentes si analizamos toda la traza del ducto en cuestión.

La alineación de soldaduras busca la correspondencia entre las soldaduras identificadas en diferentes carreras ILI. Esta alineación es convenientemente realizable mediante un software tipo GIS (Sistema de Información Geográfica), el cual proporciona herramientas para comparar las posiciones de las soldaduras y ver las discrepancias en las nomenclaturas. Esto disminuye los posibles errores que se presentan al trabajar directamente con los pipetally, los cuales no siempre tienen una correspondencia adecuada en las distancias odométricas. Sin el uso de software GIS, se requiere manipular una gran cantidad de información y verificar manualmente las diferencias entre las soldaduras en hojas de cálculo.



Figura 1. Alineación de soldaduras.

La importancia del emparejamiento de soldaduras radica en su capacidad para optimizar el proceso de emparejamiento de indicaciones, facilitando la identificación de la misma anomalía en ambas inspecciones. Esto conduce a un análisis más confiable, reduciendo la probabilidad de errores y mejorando la precisión del estudio de integridad del ducto.

3.5.3. Tratamiento probabilístico

Una vez alineadas las soldaduras, podemos proceder a emparejar las anomalías contenidas entre dos soldaduras contiguas conocidas. Partiendo de los datos de dos inspecciones, el objetivo es encontrar las parejas que pertenecen a la misma anomalía, basándonos en su posición longitudinal (x) y su posición horaria (y).

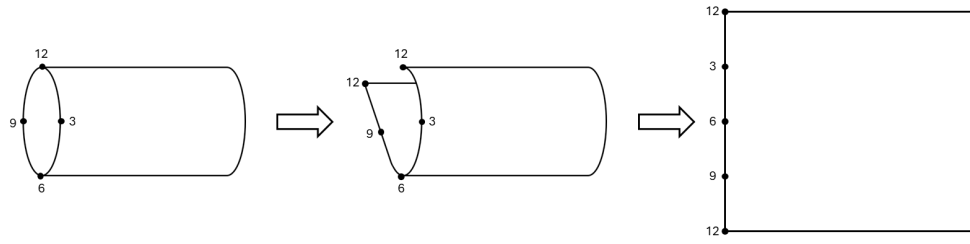


Figura 2. Despliegue del tubo a un plano 2D.

Para calcular la probabilidad de que dos indicaciones de diferentes inspecciones, con posiciones en x e y representadas por distribuciones normales, tengan las mismas coordenadas (es decir, que representen la misma anomalía), utilizamos las propiedades de las distribuciones normales en dos dimensiones (2D).

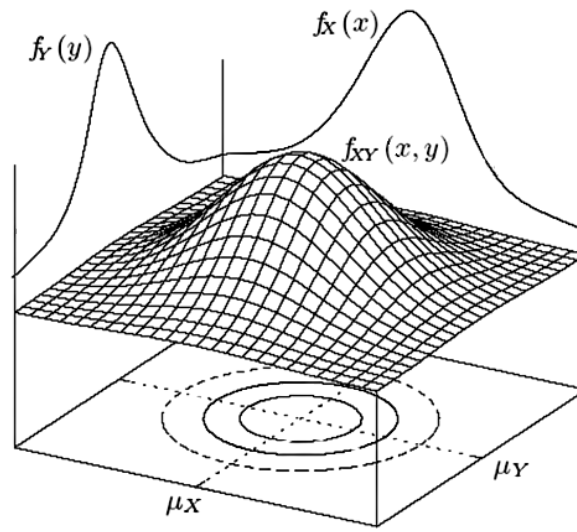


Figura 3. Interpretación de indicaciones como variables aleatorias bivariadas.

Partiendo de que las posiciones de las dos indicaciones están definidas por distribuciones normales bivariadas, tenemos:

- Primer indicación: $I_1 = (X_1, Y_1); N(\mu_1, \Sigma_1)$
- Segunda indicación: $I_2 = (X_2, Y_2); N(\mu_2, \Sigma_2)$

Donde:

- $\mu_1 = (\mu_{x_1}, \mu_{y_1})$ y $\Sigma_1 = \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_1}^2 \end{pmatrix}$
- $\mu_2 = (\mu_{x_2}, \mu_{y_2})$ y $\Sigma_2 = \begin{pmatrix} \sigma_{x_2}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_2}^2 \end{pmatrix}$

La diferencia entre las posiciones de los dos elementos D también sigue una distribución normal bivariada:

$$D = (X_1 - X_2, Y_1 - Y_2); N(\mu_D, \Sigma_D)$$

Donde:

- $\mu_D = (\mu_{x_1} - \mu_{x_2}, \mu_{y_1} - \mu_{y_2})$ y $\Sigma_D = \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2 \end{pmatrix}$

No podemos determinar la probabilidad de que las dos indicaciones tengan exactamente las mismas coordenadas (x,y) , por lo cual evaluamos la función de densidad de probabilidad (PDF) de la distribución de la diferencia en el punto $(0,0)$, como dato indicador de la probabilidad de que exactamente las dos indicaciones son la misma anomalía.

$$P(D = (0,0)) = f_D(0,0)$$

La PDF de una distribución normal bivariada es:

$$f_D(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi|\Sigma_D|}} e^{\left(-\frac{(d-\mu_D)^T \Sigma_D^{-1} (d-\mu_D)}{2}\right)}$$

Donde:

- $d = (x,y)$

3.5.4. Verificación del conjunto

En este trabajo, el objetivo no es encontrar la mejor solución individual para cada emparejamiento de indicaciones, ya que esto puede llevar a errores significativos y evitar la identificación de la solución más probable. En lugar de centrarnos en emparejamientos individuales, se plantea una estrategia que considera la totalidad del conjunto de anomalías dentro del área analizada.

Observando el caso presentado en la Figura 4, se puede ver cómo la indicación 1 de la inspección A (1A) se corresponde mejor con la indicación 2 de la inspección B (2B), en comparación con la anomalía 1B. Sin embargo, si se opta por este emparejamiento, las indicaciones 2A y 1B quedarían sin emparejar, resultando en un error probabilístico, siempre y cuando la probabilidad del conjunto sea mayor a la individual. Este ejemplo demuestra la necesidad de que el emparejamiento de anomalías tome en cuenta la visión global de todas las anomalías presentes en el área de análisis.

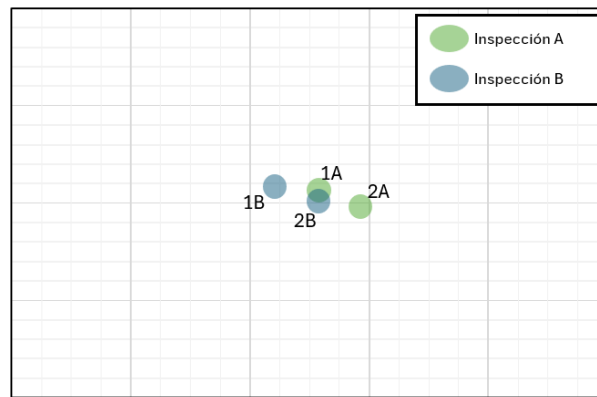


Figura 4. Ejemplo emparejamientos individuales vs múltiples.

Para abordar esta necesidad, se propone determinar el conjunto de emparejamientos que resulte en la mayor probabilidad conjunta, en lugar de optimizar cada emparejamiento de forma aislada. Este cambio estratégico implica que la suma de las probabilidades de las indicaciones emparejadas debe ser la máxima posible, considerando todas las combinaciones de “emparejamientos” y “no emparejamientos” posibles. Esta metodología, aunque más compleja, garantiza una evaluación más fiable.

Para el ejemplo presentado sería:

Si $(P_{1A/1B} + P_{2A/2B}) > P_{1A/2B} \rightarrow (1A \ 1B)$ son parejas y $(2A \ 2B)$ son parejas.

Si $P_{1A/2B} > (P_{1A/1B} + P_{2A/2B}) \rightarrow (1A \ 2B)$ son parejas. 2A y 1B no tienen pareja.

3.5.5. Ajuste por posibles errores sistemáticos

Es fundamental considerar la posibilidad de errores sistemáticos en las mediciones de las indicaciones en cada inspección. Por ejemplo, en el caso ilustrado en la Figura 5, tanto la indicación 1 como la indicación 2 de la inspección A podrían emparejarse con la indicación 1 de la inspección B. Si las dispersiones en las mediciones de dichas anomalías son semejantes, podría ocurrir que la anomalía 1B tenga mayor probabilidad de ser emparejada con la anomalía 1A en vez de con la anomalía 2A. Este emparejamiento depende de la posición inicial del estudio, la cual puede estar errada debido a errores de medición tanto longitudinales como horarias.

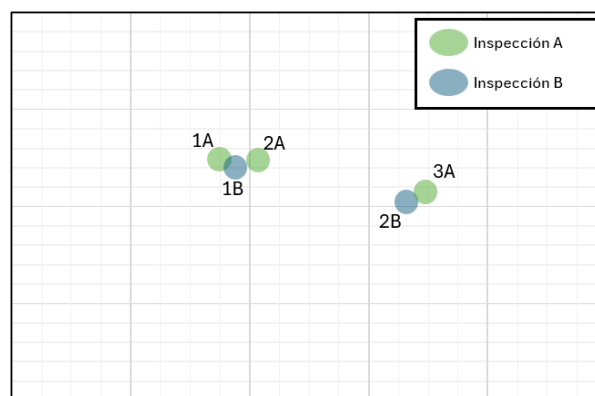


Figura 5. Ejemplo dificultad errores sistemáticos. Detalle 1.

Si observamos las indicaciones 2B y 3A podemos inferir que estas dos se corresponden.

Entonces, al analizar el conjunto total: si emparejamos la indicación 3A con la indicación 2B y ajustamos la posición de la inspección B respecto a la inspección A (ver Figura 4), la indicación que tiene mayor probabilidad de emparejarse con la indicación 2B es la 2A.

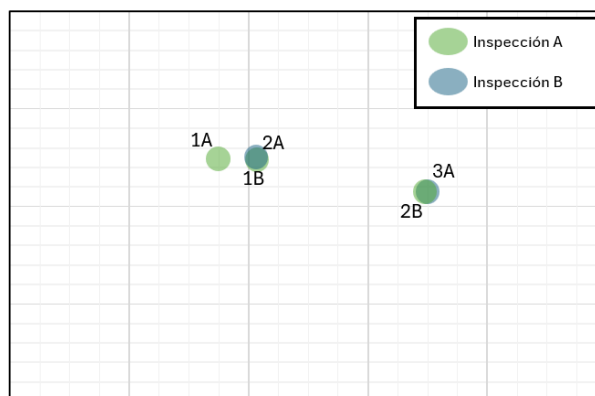


Figura 6. Ejemplo dificultad errores sistemáticos. Detalle 2.

Este análisis global permite ajustar los resultados por posibles errores sistemáticos y mejorar la precisión del emparejamiento de indicaciones.

Al considerar la totalidad del conjunto y realizar ajustes necesarios en la posición de las inspecciones, se incrementa la fiabilidad del proceso.

3.5.6. Consideraciones de borde

Además de lo ya mencionado, es importante tener en cuenta que en los extremos del área analizada (recordando que se analiza entre soldaduras consecutivas) pueden existir anomalías que hayan cambiado su punto de referencia. Si no consideramos un margen extra en el análisis sobre el eje longitudinal del ducto, podríamos estar omitiendo emparejamientos reales.

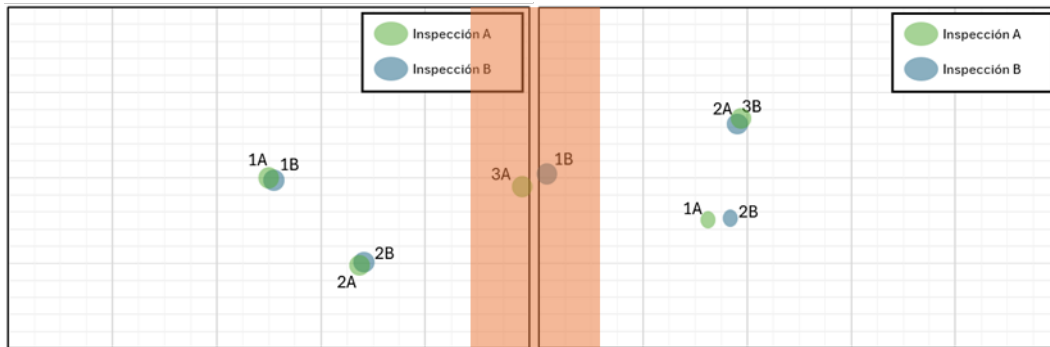


Figura 7. Ejemplo condición de borde.

Para abordar esto, se propone realizar un solapamiento de cálculos a cada lado de las soldaduras que contienen el área de análisis. De esta manera, se crean áreas de borde donde el análisis se realiza en dos instancias consecutivas, eligiendo los emparejamientos que resulten en una mejor probabilidad a nivel global de que las indicaciones sean las mismas.

Este enfoque garantiza que no se pierdan emparejamientos debido a errores o cambios de posicionamiento en los bordes del área de análisis.

3.5.7. Implementación

La implementación de esta propuesta de solución se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación Visual Basic, específicamente Visual Basic for Applications (VBA) bajo el software Microsoft Excel. Se optó por esta implementación porque la herramienta resultante debe ser amigable para el usuario promedio, y Microsoft Excel es la herramienta preferida por técnicos e ingenieros para manipular datos numéricos en volúmenes bajos a medios.

Además de esto, también se consideró el poder de cálculo necesario y las herramientas disponibles para llevar adelante una implementación eficiente; no serviría de nada que el cálculo tomara semanas en ejecutarse. Considerando la complejidad del problema y las herramientas existentes en programación, la mejor opción hubiera sido utilizar el lenguaje de programación Python implementado en una interfaz independiente. Sin embargo, el desarrollo hubiera requerido más recursos y la interfaz resultante debería ser bien estudiada para que resultara intuitivo y cómodo para el usuario. Si bien el tiempo de desarrollo en Python resultaría menor, los beneficios en tiempo de ejecución no serían significativos.

Por ejemplo, en el caso de una línea de poco más de 100 km con más de 2300 anomalías reportadas, la ejecución del emparejamiento de dos inspecciones ILI toma menos de 5 minutos con el algoritmo de VBA en una notebook de prestaciones medias. Pasar de un trabajo de días a 5 minutos o 3 minutos no presenta una gran diferencia, y la reducción de tiempos de desarrollo de una interface sumado a la predilección de una interface ya conocida, justifica esta elección.

Por otra parte, para esta implementación los cálculos se realizan en áreas contenidas entre soldaduras que previamente fueron verificadas y preparadas para ser emparejadas entre las dos inspecciones bajo análisis. Para cada área, se asegura que el emparejamiento obtenido sea el que resulta en la mayor probabilidad del conjunto, teniendo en cuenta tanto los errores aleatorios como los posibles errores sistemáticos.

3.5.8. Interface de usuario

Como se mencionó anteriormente, la interfaz implementada es la misma hoja de cálculo, donde de manera sencilla se determinan de dónde provienen los datos de las inspecciones a emparejar.

Además, se deben indicar los datos respecto a los errores de medición de cada herramienta implementada y de qué manera se identifican las diferentes indicaciones en los archivos pipetally (soldaduras, indicaciones de pérdida de metal, ubicación de la indicación, etc.).

Luego de realizar el emparejamiento, se visualiza de manera gráfica cuáles fueron las indicaciones emparejadas. Esto ayuda al especialista a verificar el correcto emparejamiento y a analizar casos específicos, todo dentro de un ambiente conocido y familiar.

The screenshot shows the main interface of the ACONCAGUA INGENIERIA software. It includes input fields for 'OPERADORA' and 'DUCTO', a 'COMENZAR' button, and several configuration tables. The 'Carrera 1' section shows inspection data for 2021, including file path, sheet, and first data row. The 'Carrera 2' section shows inspection data for 2016. The 'Configuración Archivos (Columnas)' table lists various parameters like Event, Type, Odometer, and Welder. The 'Datos Herramientas' table lists tool specifications like Precision Axial, Circumferential, and Depth. A 'Diámetro del Ducto (in)' field is set to 14.

Figura 8. Pantalla principal solución implementada.

La elección de Microsoft Excel como interfaz de usuario permite a los técnicos e ingenieros interactuar con la herramienta sin necesidad de capacitación adicional en el manejo de un software nuevo, aprovechando su conocimiento existente de la plataforma. Además, la representación gráfica facilita la validación visual de los emparejamientos, permitiendo una revisión rápida y eficiente de los resultados obtenidos.

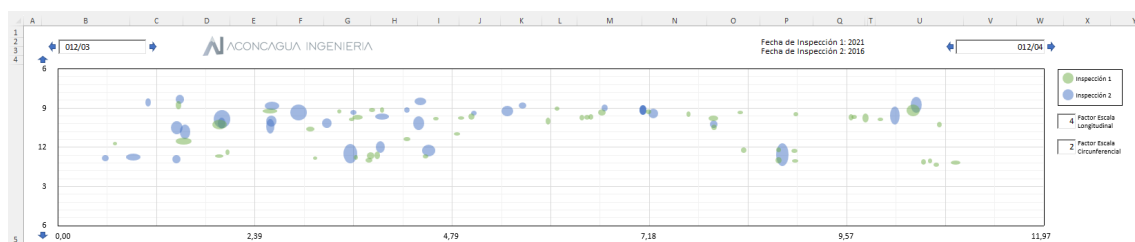


Figura 9. Visor de indicaciones y emparejamientos.

3.6. Tratamiento Estadístico de la Velocidad de Pérdida de Metal

Si bien la actividad de emparejamiento ha concluido, aún queda la parte fundamental de este trabajo, que es determinar una velocidad de pérdida de metal tanto interna como externa. Esto nos permitirá indicar el estado del ducto en tiempos futuros o estimar su estado actual si ambas inspecciones utilizadas fueron realizadas en el pasado.

Las indicaciones emparejadas representan dos estados en diferentes momentos de la misma anomalía. Cada una de ellas tendrá un valor de profundidad, longitud y ancho. A partir de estos valores, podemos calcular la diferencia entre estos dos estados y, de ahí, obtener un primer valor de velocidad de pérdida de metal para cada anomalía emparejada.

La normativa DNVGL-RP-F101 indica que las velocidades de corrosión estimadas y utilizadas en los cálculos de integridad deben ser aquellas para las cuales se tenga una certeza del 95%. Esto implica que, a partir de los resultados de los emparejamientos, debemos tratar estadísticamente las velocidades de pérdida de metal de estas anomalías para obtener un valor representativo para todo el tramo analizado, o subtramos, según requiera el especialista en cada caso particular.

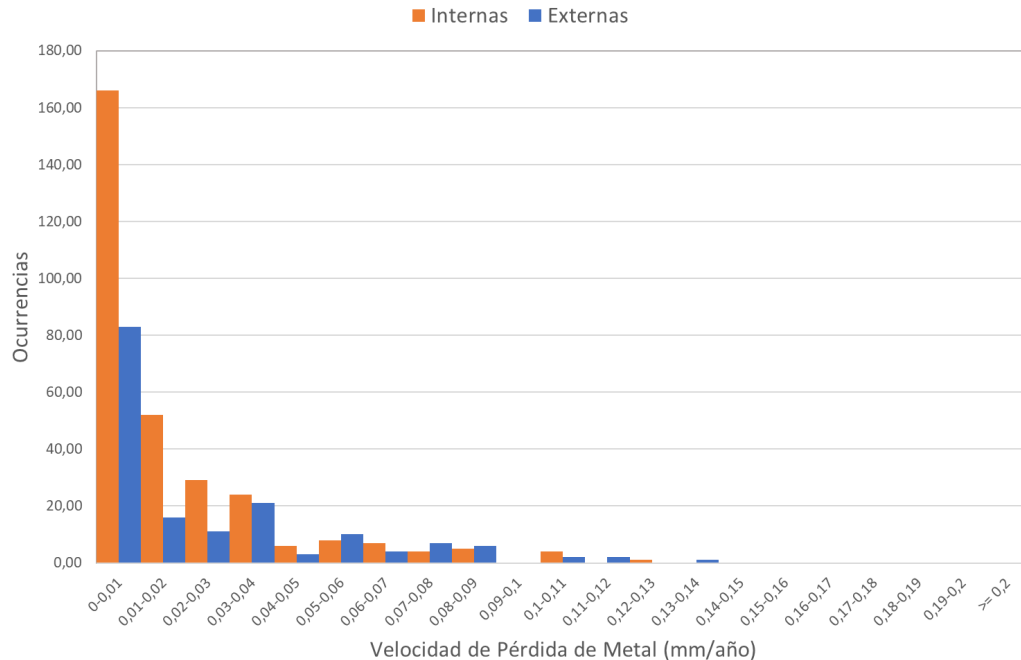


Figura 10. Histograma de velocidades de pérdida de metal.

A partir del gráfico de la Figura 10, podríamos realizar una primera estimación de las velocidades de corrosión, pero debemos tener en cuenta que las velocidades calculadas son variables aleatorias, es decir, cada medición tiene una función de distribución normal centrada en el valor medio indicado y con un error (asignado por el fabricante de cada instrumento), generalmente asociado a una certeza del 95%. Por lo tanto, en el gráfico anterior, sólo hemos representado sus valores promedios y no hemos considerado la distribución completa de cada una de las variables aleatorias.

Para ello, necesitamos obtener una función de distribución de velocidades para el tramo bajo análisis, el cual se obtiene a partir de combinar cada una de las variables aleatorias de velocidad de cada anomalía particular.

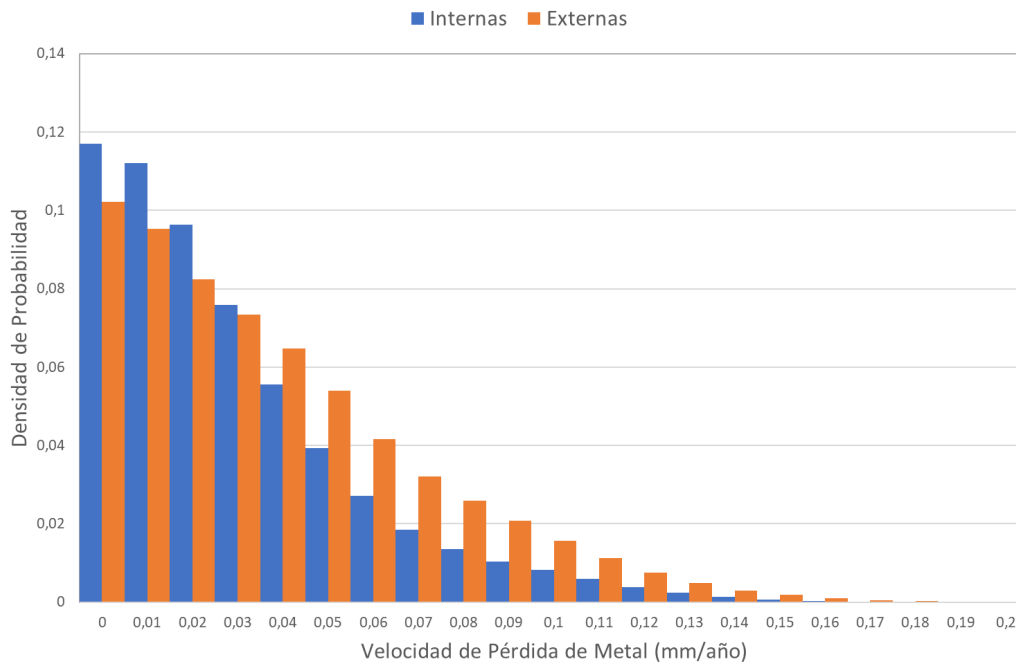


Figura 11. Densidad de probabilidad de velocidades de pérdida de metal.

Para obtener el gráfico de la Figura 11, se implementó el método Montecarlo, donde asignamos de forma aleatoria y para cada variable aleatoria de velocidad, miles de valores que respetan sus funciones de distribución. De esta manera, juntando todos los valores de todas las velocidades de las anomalías emparejadas, formamos el gráfico ilustrado de distribución de velocidades para todo el tramo bajo análisis.

Ahora sí, a partir del gráfico en Figura 9, podemos determinar cuál es el valor de velocidad de pérdida de metal que nos asegura una certeza del 95% tanto para el caso interno como para el caso externo.

Con estas velocidades de pérdida de metal interna y externa, podemos calcular el estado actual o futuro de cada anomalía (según sea el caso). Una vez calculados las profundidades de las anomalías a un tiempo futuro respecto a las inspecciones, podremos avanzar con la evaluación de integridad siguiendo, por ejemplo, los lineamientos de ASME B31.G (“Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines”).

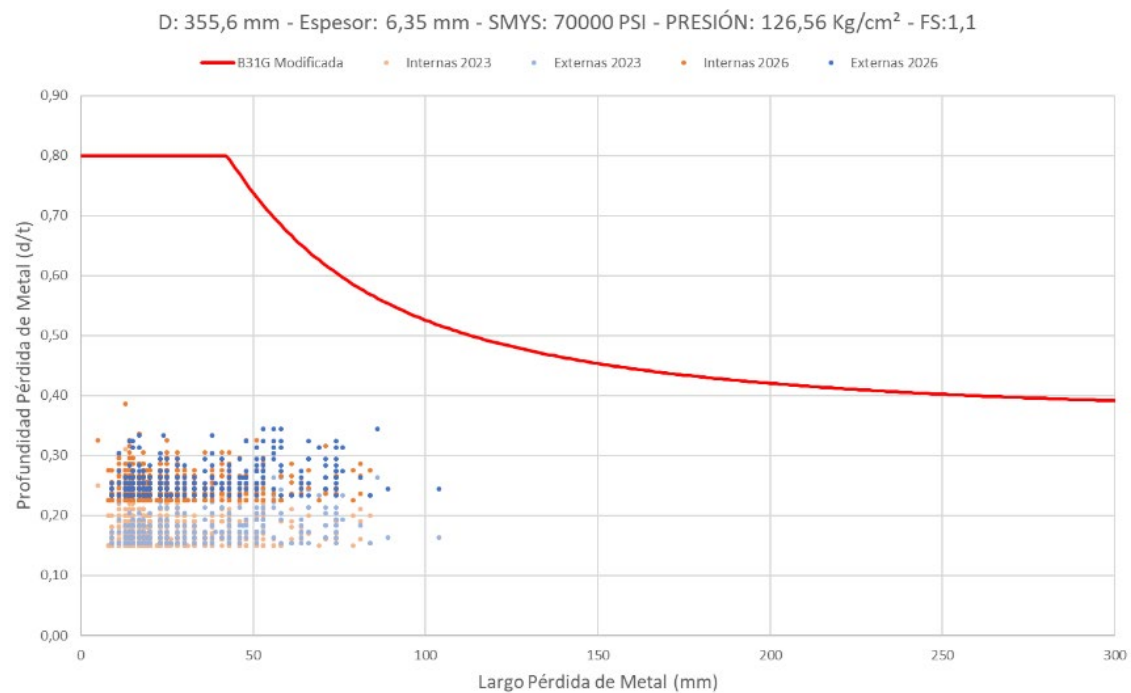


Figura 12. Ejemplo de crecimiento de anomalías y verificación de integridad.

3.7. Ejemplo de Implementación

En esta sección, se presenta un caso práctico utilizando datos reales de dos inspecciones ILI para comparar la metodología planteada en este trabajo con una metodología tradicional.

Se realizaron dos inspecciones ILI en un ducto, y se evaluaron las velocidades de corrosión interna y externa usando dos enfoques diferentes: un enfoque tradicional y la metodología planteada en este trabajo.

3.7.1. Metodología tradicional

- Selección de Anomalías: Se seleccionaron las 36 anomalías más profundas de la última inspección.
- Emparejamiento de Anomalías: De estas 36 anomalías, se pudieron emparejar 23 con la inspección anterior.
- Cálculo de Velocidades: A partir de estos 23 emparejamientos y aplicando un análisis estadístico de los resultados, se obtuvieron las siguientes velocidades de corrosión con un 95% de certeza:
 - Corrosión Interna: 0.13 mm/año
 - Corrosión Externa: 0.15 mm/año
- Valores Máximos Detectados: Sin un análisis estadístico, las velocidades de corrosión se hubieran estimado en:
 - Corrosión Interna: 0.12 mm/año (valor máximo detectado)
 - Corrosión Externa: 0.14 mm/año (valor máximo detectado)

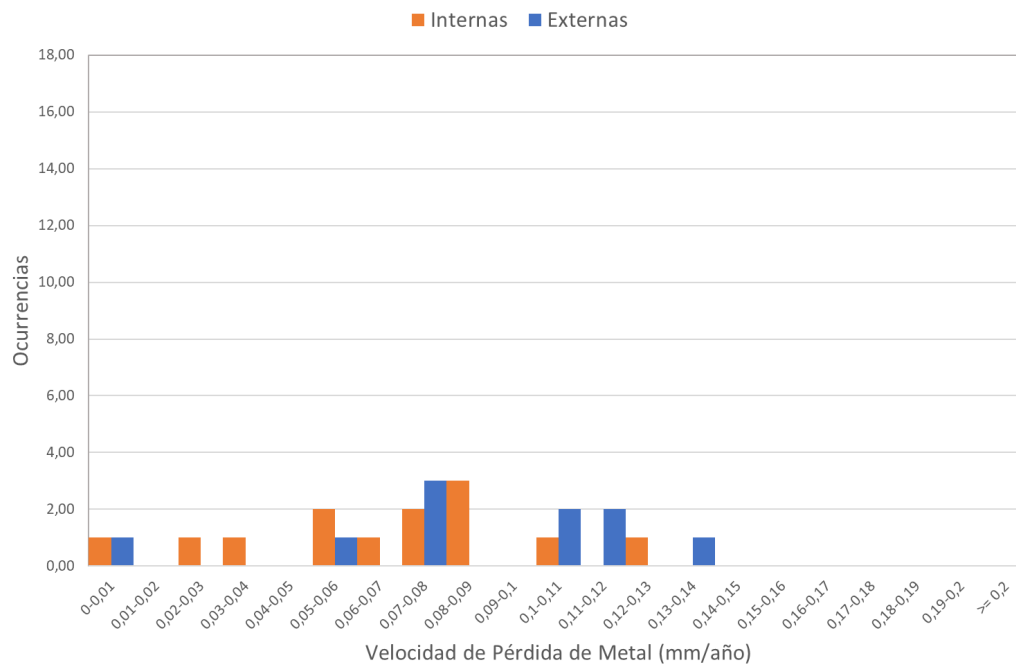


Figura 13. Resultados de los emparejamientos aplicando una metodología tradicional.

3.7.2. Metodología planteada por este trabajo

- Selección de Anomalías: Se trabajó con todas las anomalías detectadas en la última inspección.
- Emparejamiento de Anomalías: Se pudieron emparejar 472 anomalías con la inspección anterior.
- Cálculo de Velocidades: A partir de estos emparejamientos y aplicando un tratamiento estadístico, se obtuvieron las siguientes velocidades de corrosión con una certeza del 95%:
 - Corrosión Interna: 0.07 mm/año
 - Corrosión Externa: 0.09 mm/año
- Valores Máximos Detectados: Sin un análisis estadístico, las velocidades de corrosión se hubieran estimado en:
 - Corrosión Interna: 0.12 mm/año (valor máximo detectado)
 - Corrosión Externa: 0.14 mm/año (valor máximo detectado)

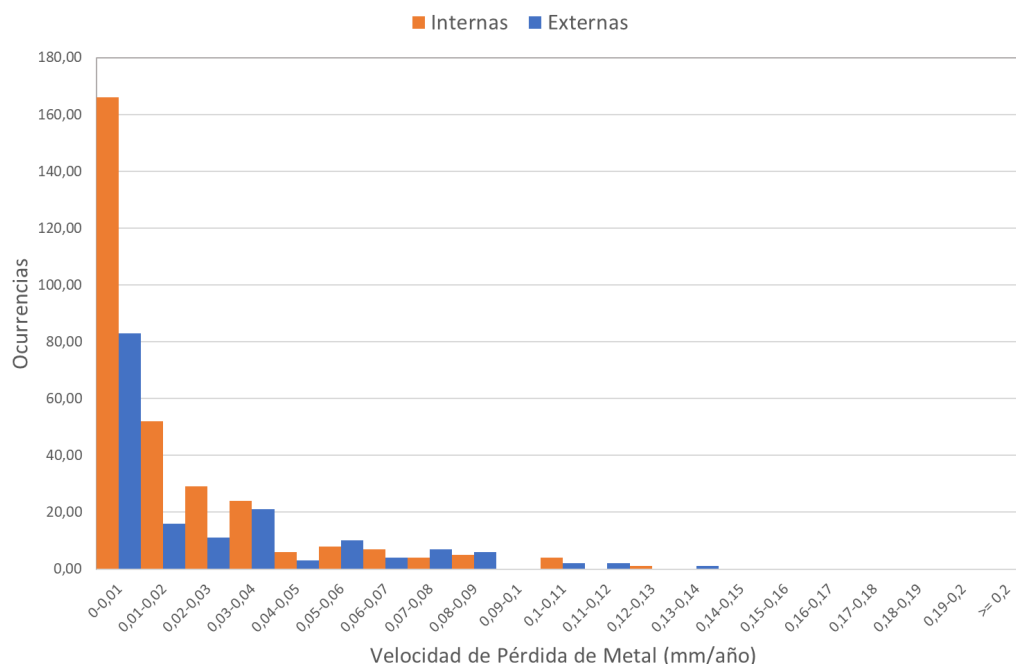


Figura 14. Resultados de los emparejamientos aplicando la metodología planteada.

3.7.3. Comparativa de resultados

La comparación de resultados entre ambas metodologías muestra diferencias significativas en las estimaciones de las velocidades de corrosión:

Metodología Tradicional: La velocidad de corrosión interna fue estimada en 0.13 mm/año y la externa en 0.15 mm/año, basándose en un conjunto reducido de 23 emparejamientos.

Metodología Planteada: La velocidad de corrosión interna fue estimada en 0.07 mm/año y la externa en 0.09 mm/año, basándose en un conjunto amplio de 472 emparejamientos.

Esta diferencia se debe a que la metodología planteada considera un conjunto mucho más amplio de datos, lo que permite obtener una estimación más precisa y representativa de las velocidades de corrosión. Además, el tratamiento estadístico aplicado asegura que las estimaciones sean robustas y con un nivel de certeza del 95%.

3.7.4. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos al comparar la metodología tradicional con la metodología planteada en este trabajo destacan la importancia de una evaluación precisa y representativa de la integridad de los ductos. Usar únicamente las 36 anomalías más profundas de la última inspección y emparejar solo 23 de ellas con la inspección anterior puede parecer conservador, pero presenta limitaciones. Este enfoque puede sesgar el análisis al centrarse solo en las anomalías más profundas, lo que podría llevar a una sobreestimación o subestimación de la integridad del ducto. Aunque es cierto que, en general, las anomalías más profundas suelen ser las de mayor velocidad de corrosión, basar todo el análisis en un subconjunto limitado puede no reflejar la situación completa del ducto.

En contraste, la metodología planteada en este trabajo considera todas las anomalías detectadas, emparejando 472 de ellas con la inspección anterior, lo que reduce el sesgo y proporciona una estimación más precisa de las velocidades de corrosión. Los valores obtenidos, 0.07 mm/año (interna) y 0.09 mm/año (externa) con una certeza del 95%, indican una situación más favorable y precisa. Aunque usar un valor de velocidad de corrosión más alto puede parecer un enfoque conservador, en realidad plantea un escenario que no se corresponde con la realidad del ducto.

Esto es especialmente crítico cuando las anomalías más profundas no coinciden exactamente con las de mayor crecimiento.

Es importante que, en lugar de adoptar un enfoque conservador sesgado por un análisis manual limitado, el ingeniero de integridad pueda utilizar la velocidad de corrosión más precisa posible y luego aplicar factores de seguridad apropiados en la etapa de evaluación de integridad. Esto se alinea con prácticas estándar como las recomendadas en ASME B31.G, donde se utilizan factores de seguridad conscientes y específicos. De este modo, el enfoque conservador se aplica de manera informada y cuantificable, asegurando que las decisiones se basen en datos precisos y representativos de la condición real del ducto, y no en estimaciones potencialmente imprecisas.

4. Conclusiones

En este trabajo, hemos desarrollado una metodología para el emparejamiento de indicaciones de inspecciones ILI, con el objetivo de mejorar la precisión y eficiencia en la evaluación de la integridad de los ductos. La implementación de esta metodología mediante VBA en Microsoft Excel ha demostrado ser una solución accesible y efectiva, facilitando la automatización y optimización del proceso de emparejamiento.

Principales Hallazgos y Beneficios:

- La verificación y alineación de soldaduras entre diferentes inspecciones es un paso crucial que reduce significativamente los errores acumulados en la posición longitudinal, permitiendo un análisis más preciso de pequeños tramos del ducto.
- La utilización de un modelo probabilístico para emparejar las anomalías, basándonos en distribuciones normales bivariadas, permite calcular una medida de la probabilidad de que dos indicaciones representen la misma anomalía. Esto mejora la confiabilidad del emparejamiento.
- En lugar de optimizar emparejamientos individuales, considerar la totalidad del conjunto de anomalías dentro del área analizada garantiza una mayor probabilidad conjunta, reduciendo así la posibilidad de errores y proporcionando una evaluación más fiable.
- La consideración de posibles errores sistemáticos en las mediciones mejora la precisión del emparejamiento de indicaciones, ajustando las posiciones iniciales de los estudios y aumentando la fiabilidad del proceso.
- La elección de Microsoft Excel como interfaz de usuario y la implementación en VBA permiten realizar cálculos rápidos y eficientes, reduciendo significativamente el tiempo de procesamiento de días a minutos. La elección de esta plataforma queda justificada debido a su accesibilidad y familiaridad para los usuarios.
- La inclusión de márgenes adicionales en el análisis evita la omisión de emparejamientos reales en los extremos del área analizada, asegurando que las anomalías en los bordes sean correctamente emparejadas.
- La metodología implementada permite calcular las velocidades de pérdida de metal interna y externa con un nivel de certeza del 95%, proporcionando una base sólida para estimar el estado actual o futuro del ducto y para realizar los cálculos de integridad necesarios.
- La interfaz gráfica implementada facilita la validación visual de los emparejamientos, permitiendo una revisión rápida y eficiente de los resultados obtenidos, y asegurando la correcta identificación de las anomalías.

5. Definiciones

Algoritmo: Conjunto de instrucciones o reglas definidas y ordenadas que permiten realizar una tarea o resolver un problema específico de manera sistemática y eficiente. En este trabajo, los algoritmos se utilizan para procesar datos, calcular probabilidades y emparejar anomalías.

Anomalía: Defecto o irregularidad detectada en el ducto mediante inspecciones ILI. Las anomalías pueden incluir pérdidas de metal, grietas, deformaciones u otros tipos de defectos que podrían afectar la integridad del ducto. En este trabajo, sólo se consideran las anomalías de pérdida de metal.

Distribución Normal Bivariada: Una extensión de la distribución normal a dos dimensiones, donde cada variable tiene una distribución normal y puede haber una correlación entre ellas. Se utiliza para modelar la posición de anomalías en términos de sus coordenadas longitudinales y horarias. En este trabajo se considera el caso particular donde las variables son independientes.

Emparejamiento: En el contexto de este trabajo, el emparejamiento se refiere al proceso de comparar y correlacionar datos de inspecciones ILI realizadas en diferentes momentos, con el fin de identificar indicaciones recurrentes que representan la misma anomalía en el ducto.

Errores Aleatorios: Variaciones impredecibles en las mediciones que ocurren debido a factores externos y no controlables. Estos errores son inevitables, pero sus efectos pueden ser minimizados mediante técnicas estadísticas.

Errores Sistemáticos: Desviaciones constantes y predecibles en las mediciones que ocurren debido a factores inherentes a los métodos de medición o a los instrumentos utilizados.

Función de Densidad de Probabilidad (PDF): Función que describe la probabilidad relativa de que una variable continua tome un valor específico. En este trabajo, la PDF se utiliza para evaluar la probabilidad de que dos indicaciones sean la misma anomalía.

GIS (Sistema de Información Geográfica): Sistema que permite almacenar, manipular, analizar y visualizar datos geoespaciales. En el contexto de este trabajo, se utiliza para comparar y analizar los datos de las inspecciones ILI.

Interfaz de Usuario: Medio a través del cual los usuarios interactúan con un sistema informático.

In-Line Inspection (ILI): Método de inspección no destructiva que utiliza herramientas especializadas para evaluar la condición interna y externa de los ductos, detectando y dimensionando anomalías como pérdidas de metal, grietas y deformaciones.

Método Monte Carlo: Técnica de simulación que utiliza muestras aleatorias para estimar propiedades estadísticas de un sistema. En este trabajo, se utiliza para generar distribuciones de velocidades de pérdida de metal a partir de los datos de las inspecciones.

Notebook de prestaciones medias: Se refiere a una computadora portátil con especificaciones técnicas intermedias, adecuadas para realizar tareas de procesamiento de datos y cálculos estadísticos sin requerir un alto rendimiento. Generalmente, incluye un procesador de gama media (Intel i5, AMD Ryzen 5), memoria RAM entre 8 y 16 GB, y capacidad de almacenamiento moderada (200GB a 500GB).

Python: Lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, conocido por su sintaxis sencilla y legibilidad.

Tasa de Corrosión: Velocidad a la cual el metal de las paredes del ducto se desgasta debido a la corrosión. Se calcula a partir de la diferencia de profundidades entre inspecciones consecutivas y se utiliza para proyectar el crecimiento de anomalías.

Variable aleatoria: En estadística y probabilidad, una variable aleatoria es una función que asigna un valor numérico a cada uno de los posibles resultados de un experimento aleatorio. Las variables aleatorias pueden ser discretas (tomar un conjunto finito o contable de valores) o continuas (tomar cualquier valor dentro de un intervalo continuo). En este trabajo, las variables aleatorias se utilizan

para modelar las mediciones de las anomalías detectadas en las inspecciones ILI, considerando tanto su valor medio como su distribución de probabilidad.

Visual Basic for Applications (VBA): Lenguaje de programación incluido en Microsoft Excel y otras aplicaciones de Microsoft Office, que permite automatizar tareas y desarrollar aplicaciones personalizadas dentro de estos entornos.

6. Bibliografía

- NACE SP0102 “Inline Inspection of Pipelines”.
- API STD1163 “In-line Inspection Systems Qualification”.
- DNVGL-RP-F101 “Corroded Pipelines”.
- ASME B31G “Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines”.
- Montgomery, D.C., & Runger, G.C. “Applied Statistics and Probability for Engineers”.
- Markus R. Danna, Christoph Dannb. “Automated matching of pipeline corrosion features from in-line Inspection data”.

7. CVs

7.1.1. Esteban Adrián Cáceres

Ingeniero Electromecánico, UNMdP. Más de 4 años de experiencia en el sector de Oil & Gas, especializado en desarrollo de productos y servicios, supervisión de personal y automatización. Ejecución de proyectos de análisis de riesgo y análisis de datos ILI, además de desarrollar tecnologías para mejorar procesos internos. También he participado en proyectos de tratamiento de efluentes, incluyendo minería de litio. He ejecutado múltiples proyectos de programación de software y automatización industrial (Python, VBA, PLC's).

Actualmente es Líder de Desarrollo Tecnológico en Aconcagua Ingeniería.

7.1.2. Mayra Lagarde

Ingeniera Mecánica, UNMdP. Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales, UNMdP.

Especialista Sr. en Integridad de Ductos con 14 años de experiencia. Certificación APM Foundation User Meridium. Autora de publicaciones internacionales y reconocida en congresos por su trabajo en tribología y gestión de integridad. Distinguida en el 7° Congreso Bolivia Gas & Energía por su contribución en la gestión de integridad de gasoductos de distribución. AMPP Member No. 11505571. Pipeline Corrosion Integrity Management.

Actualmente es Especialista Senior en Aconcagua Ingeniería.

7.1.3. Luciano Carlini

Luciano Carlini. Es Ingeniero Mecánico, graduado en 2008 en la Facultad de Ingeniería de la UNMDP. Posee más de 18 años de experiencia en la industria de Oil&Gas. Participó de proyectos relacionados con Integridad de Ductos y Facilidades en Argentina, Perú, Bolivia y otros países de la región. Participó en congresos internacionales con publicaciones relacionadas con Riesgo e Integridad. Obtuvo la distinción en el 7° Congreso Bolivia Gas & Energía por su aporte en el área de Gas Natural. Actualmente es Gerente de Desarrollo de Aconcagua Ingeniería.