

ANÁLISIS DE DEFECTO POR CORROSIÓN. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DEL MÉTODO PLAUSIBLE PROFILES (P2)

Autor: Alan Cornejo – Matias Vigliano - Santiago Parodi

Empresa: Transportadora de Gas del Norte S.A. (TGN)

Email: alan.cornejo@tgn.com.ar , matias.vigliano@tgn.com.ar, Santiago.parodi@tgn.com.ar

SINOPSIS

El presente trabajo detallará la implementación y aplicación del método PSQR (Plausible Profiles) para cálculos de aptitud para el servicio de defectos por corrosión. Este método representa una evolución significativa en la evaluación de integridad de ductos corroídos, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales como ASME B31G, B31G Modificado, RSTRENG y API 579 Parte 5. Mientras estos modelos se basan en el perfil “river-bottom” que proyecta los puntos de corrosión más profundos en un plano, asumiendo la peor interacción posible PSQR propone un enfoque probabilístico que considera la distribución real de la corrosión.

PSQR genera una cuadrícula de alta resolución del área afectada y simula cientos de perfiles posibles de interacción entre dichos puntos de corrosión. Para cada perfil, se calcula la presión de falla utilizando la metodología de área efectiva de RSTRENG. El resultado final es el percentil 5 de la distribución de presiones, garantizando robustez y seguridad sin incurrir en conservadurismo excesivo. Una innovación clave es el Factor de Alineamiento Axial (AAF), que permite al modelo revertir a un cálculo tipo RSTRENG en zonas donde la corrosión es estrecha y alineada axialmente, asegurando que los defectos críticos no sean subestimados y manteniéndolos siempre del lado de la seguridad.

Comparado con métodos tradicionales, PSQR ofrece mayor precisión (las predicciones se acercan más a la presión de falla real), menor dispersión (resultados más consistentes y confiables) y reducción de intervenciones innecesarias (hasta un 80% menos de excavaciones y 89% menos de reparaciones en estudios validados con datos de campo). Sin embargo, su implementación requiere ajustes en criterios de evaluación, procedimientos de inspección, incorporación de escáneres de alta resolución y adaptación del proceso ILI para anomalías severas. Además, PSQR no debe aplicarse en casos de corrosión en costuras ERW, dentro de abolladuras, picaduras >80% del espesor, ranurado circunferencial o ductos bajo cargas axiales extremas. En conclusión, PSQR permite una evaluación más realista y eficiente de la integridad de ductos, optimizando recursos sin comprometer la seguridad. Su adopción representa un cambio paradigmático en la gestión de activos de transporte de gas.

INTRODUCCIÓN

La integridad estructural de los sistemas de transporte de gas natural es una actividad crítica que exige metodologías de evaluación precisas para gestionar la amenaza de la corrosión externa e interna. Históricamente, la industria ha dependido de modelos matemáticos simplificados para predecir la presión de falla de tuberías con pérdida de metal. La base de estos modelos se remonta a la década de 1970, con el desarrollo de la ecuación semiempírica NG-18 por parte del Instituto Battelle.

El primer estándar formalizado fue el ASME B31G, lanzado en 1984. Este método de "Nivel 1" fue diseñado para ser simple y conservador, permitiendo a los operadores evaluar defectos basándose únicamente en la profundidad máxima y la longitud total. El modelo asume que los defectos cortos tienen una geometría parabólica según lo indicado en la Figura 1 - Perfil ASME B31G, utilizando una tensión de flujo (Flow stress) fijada en 1.1 veces la Tensión mínima especificada de fluencia (TFME). Si bien fue un hito en seguridad, su principal limitación es un conservadurismo excesivo que a menudo clasifica como "críticos" defectos que poseen una capacidad de carga estructural considerable, forzando reparaciones innecesarias.

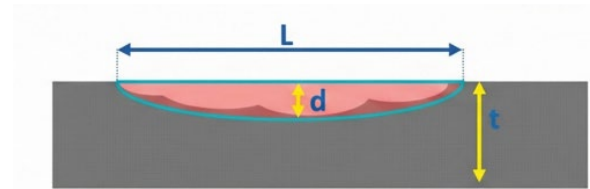


Figura 1 - Perfil ASME B31G

Evolucionando hacia una mayor precisión, surgió el ASME B31G Modificado (conocido como el criterio 0.85dL). Esta mejora ajustó la tensión de flujo a un valor más realista ($SMYS + 69 \text{ MPa}$) y propuso un factor de área de 0.85 para representar de forma más fiel la pérdida de metal según lo indicado en la Figura 2 - Perfil ASME B31G Modificado. A pesar de estas mejoras, seguía siendo un método determinista que ignoraba el perfil irregular de la corrosión.

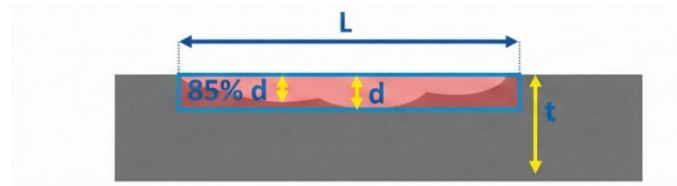


Figura 2 - Perfil ASME B31G Modificado

El salto hacia el "Nivel 2" se consolidó con el método RSTRENG (Área Efectiva). A diferencia de sus predecesores, RSTRENG utiliza el perfil de profundidad máximo detallado ("perfil de fondo de río") para calcular la presión de falla mediante la evaluación de secciones trapezoidales del defecto. No obstante, RSTRENG hereda una debilidad mecánica fundamental: la proyección bidimensional. Al proyectar todos los puntos profundos sobre el eje axial, ignora la separación circunferencial entre picaduras. Mecánicamente, dos picaduras separadas circunferencialmente no interactúan de la misma manera que si estuvieran alineadas axialmente. Este método asume una interpolación entre los valores de profundidad asociados al perfil de fondo de río para determinar la peor condición de falla asociada al defecto. Este método es extremadamente sensible al "ruido" de la señal de la herramienta de inspección interna (ILI). Si la herramienta reporta un pico de profundidad erróneo (ruido), RSTRENG asume que es real y castiga severamente la presión calculada.

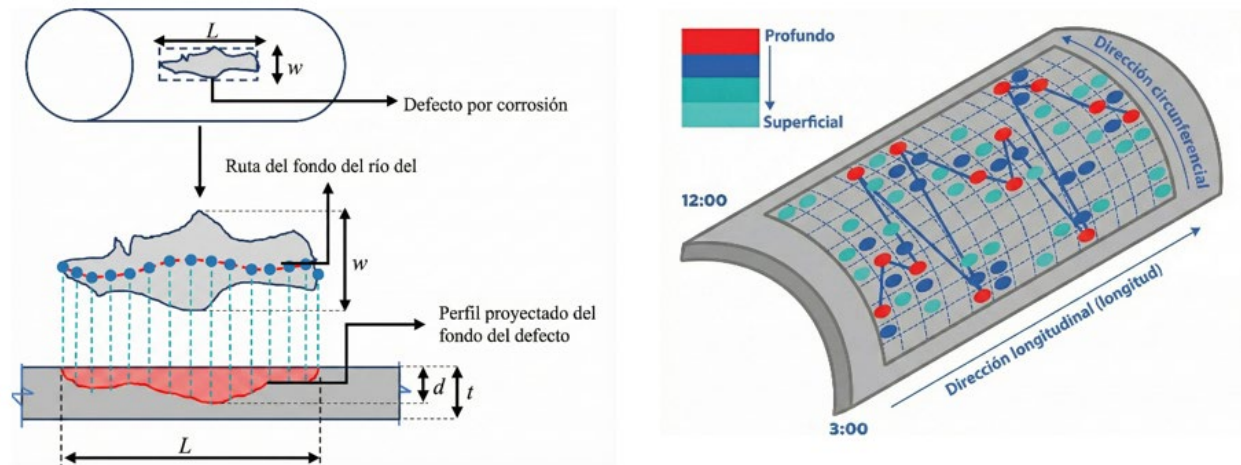


Figura 3 - Perfil de Fondo de Río RSTRENG

DESARROLLO

El Modelo de Perfiles Plausibles (PSQR), desarrollado originalmente por TransCanada Pipelines (TC Energy) y revisado exhaustivamente por expertos como John Kiefner, representa una evolución fundamental en la ingeniería de integridad de ductos, marcando una transición desde el análisis geométrico estático hacia un enfoque mecanicista-probabilístico. Este modelo surge con el objetivo principal de abordar y reducir el conservadurismo excesivo inherente a los métodos tradicionales como el RSTRENG, cuya limitación principal radica en la idealización de la forma de la pérdida de metal mediante el perfil de "fondo de río". En la práctica, este enfoque implica proyectar la profundidad de las picaduras más profundas de cada línea circunferencial sobre un único plano axial, creando un perfil artificial que conecta los puntos de máxima profundidad y suprime la realidad física de la separación circunferencial entre las picaduras.

Al ignorar esta separación, el modelo RSTRENG asume una interacción máxima o de "peor caso", lo que a menudo subestima la capacidad real resistente de la tubería corroída y conduce a excavaciones innecesarias. El PSQR corrige esto reconociendo que un defecto de corrosión no falla necesariamente a lo largo de una línea axial perfecta, sino a través de una trayectoria de menor resistencia que recorre las zonas más debilitadas de la pared del tubo. Para ello, utiliza una cuadrícula de alta resolución donde cada celda contiene un valor de profundidad y emplea un proceso de simulación estocástica (Monte Carlo) para generar cientos de "perfiles plausibles", reconstruyendo estadísticamente el perfil de corrosión más probable que sea físicamente consistente. Esto incluye el tratamiento del error de medición, reconociendo que la profundidad reportada es una variable compuesta por la profundidad real más un margen de error inherente a la herramienta de inspección.

El funcionamiento del algoritmo se basa en una lógica de "búsqueda de caminos" posibles para la corrosión y una ventana de interacción circunferencial fundamentada en la mecánica de cilindros de pared delgada, establecida usualmente en seis veces el espesor de pared ($6t$). Si dos áreas de pérdida de metal están separadas por una distancia mayor a esta ventana, el modelo reconoce que sus efectos de debilitamiento no se adicionan. Para construir cada perfil, el algoritmo selecciona puntos de inicio

(anclaje) basados en la profundidad y busca el siguiente punto de interacción siguiendo criterios probabilísticos de proximidad y severidad, lo que permite capturar la realidad tridimensional de zonas de corrosión compleja donde las picaduras están dispersas y no alineadas. Aunque el PSQR introduce una aproximación novedosa para el factor de forma, sigue basándose en los fundamentos mecánicos de RSTRENG, utilizando el área efectiva (A_{eff}), la tensión de flujo (Flow stress) y el factor de Folias (M).

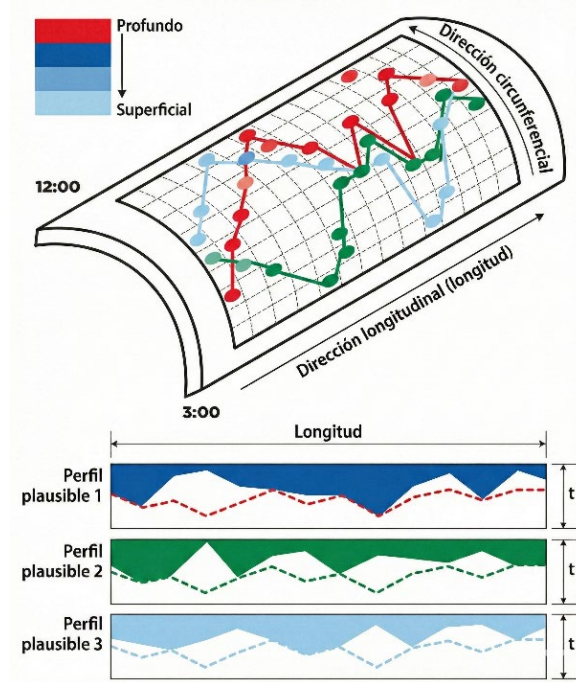


Figura 4 - Múltiples perfiles posibles

Como se indicó con anterioridad, el punto de inicio del análisis de corrosión se fundamenta en un factor ponderado por la profundidad, tal como se expresa en la Ecuación 1. En este procedimiento, la morfología de la corrosión se mapea sobre una matriz de dimensiones M por N (es decir, M filas y N columnas). Dentro de este esquema matricial, la probabilidad de que un punto de profundidad específico d_{ij} (donde $i = 1, 2, \dots, M$ y $j = 1, 2, \dots, N$) sea seleccionado como el punto de partida del algoritmo se determina mediante la siguiente relación matemática:

$$P_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N d_{kl}}$$

Ecuación 1 -Determinación de punto de anclaje

En donde P_{ij} representa la probabilidad de que el punto d_{ij} sea elegido como punto de inicio, mientras que d_{kl} corresponde a la profundidad ubicada en la k-ésima fila y l-ésima columna de la matriz.

Una vez establecido el inicio, el procedimiento para la generación de la trayectoria y la selección de puntos subsiguientes se rige por la siguiente ecuación:

$$P_i = \alpha \frac{I_i}{\sum_{j=1}^m I_j} + \beta \frac{d_i}{\sum_{j=1}^m I_j}$$

Ecuación 2 -trayectoria de anomalía

En este marco analítico, la variable P_i representa la probabilidad estadística de que una profundidad específica d_i , ubicada dentro de la ventana de interacción, sea seleccionada como el siguiente punto plausible en la trayectoria de falla. Para la determinación de esta probabilidad, el algoritmo evalúa en cada punto j de la ventana dos parámetros físicos fundamentales: su profundidad local, denotada como d_j , y la separación espacial existente respecto al punto de anclaje, definida como la distancia I_j .

La influencia relativa de estas variables sobre la probabilidad final es modulada por dos coeficientes complementarios. Por un lado, α actúa como el factor de ponderación asociado a la proximidad, gobernando la influencia de la distancia en la selección. Por otro lado, β constituye el factor de ponderación asociado a la severidad de la profundidad, cuya magnitud se define matemáticamente como el complemento de la proximidad, es decir, $1 - \alpha$.

Al utilizar múltiples perfiles posibles en lugar de un único perfil de "peor caso", PSQR busca reflejar la física real del mecanismo de falla.

Un aspecto fundamental en la confiabilidad del modelo es su riguroso tratamiento del error de medición, el cual reconoce que la profundidad reportada por la herramienta de inspección (d_{ili}) no debe interpretarse como un valor absoluto, sino como una variable aleatoria compuesta por la profundidad real (d_{real}) sumada a un componente de error (ϵ). Partiendo de esta premisa, el modelo es capaz de reconstruir estadísticamente el perfil de corrosión más probable, asegurando que los resultados sean físicamente consistentes con la realidad del ducto y no meros artefactos de los datos.

Complementando este enfoque estadístico, el PSQR aborda las limitaciones geométricas de los métodos tradicionales mediante el Factor de Alineación Axial (AAF). A diferencia de los estándares B31G (tanto el clásico como el modificado) y el RSTRENG, que asumen invariablemente que la corrosión se distribuye preferencialmente de manera longitudinal, el AAF permite evaluar la interacción de aquellos defectos que no están alineados con el eje de la cañería o que presentan una dispersión circunferencial. Esta capacidad para discernir la orientación real de la pérdida de metal mejora sustancialmente la precisión del análisis, especialmente al evaluar geometrías complejas que los modelos anteriores simplificarían en exceso.

La forma de cálculo para este factor de forma axial se basa en dividir la anomalía en “n” tiras de $L \times 6t$ y calcula, para cada i -ésima tira, la presión de falla predicha (P_{Fi}) por RSTRENG. La relación entre la mínima presión de falla obtenida y la presión de falla total de la anomalía (PF) determina el AAF.

$$AAF = \frac{\min(P_{F1}, P_{F2}, \dots, P_{Fn})}{P_F}$$

Ecuación 3 -Factor de forma axial

Dado que el modelo genera una población de presiones de falla (una por cada perfil simulado), se adopta el Percentil 5 (P5) de la distribución de resultados como criterio de decisión. Esto garantiza un 95% de confianza estadística de que la presión de falla real del gasoducto será superior a la reportada por el modelo, permitiendo que el método sea aceptado como un análisis de "Nivel 2B" por ASME B31G – Manual para la determinación de la resistencia remanente de tuberías corroídas con una precisión operativa superior que reduce el sesgo y la dispersión del error.

Finalmente, la robustez del modelo está asegurada por el Factor de Alineamiento Axial (AAF), que actúa como un “filtro de seguridad”. El algoritmo calcula la presión de falla predicha para cada tira mediante RSTRENG y compara la mínima presión obtenida con la presión de falla total de la anomalía. Si el defecto es estrecho y largo (axialmente alineado), el AAF es igual a 1, indicando que no hay beneficio en considerar la dispersión circunferencial; en este caso, el PSQR iguala automáticamente sus resultados a los de RSTRENG para no subestimar el riesgo de fallas tipo "ranura". Además, el modelo respeta restricciones normativas estrictas equivalentes a las establecidas para Rstreng.

La implementación práctica del método PSQR en TGN ha requerido una reingeniería de los procesos de verificación en campo, elevando los estándares de recolección de datos primarios. Esta fase es crítica, ya que el modelo PSQR es sensible a la calidad de los datos registrados.

El nuevo procedimiento de evaluación en campo comienza una vez excavada la cañería, momento en el cual se ejecuta una limpieza mecánica rigurosa, típicamente mediante un arenado a grado comercial, con el fin de exponer completamente el metal base. Esta etapa de preparación superficial es crítica, ya que la presencia de cualquier remanente de revestimiento o productos de corrosión introduciría ruido en la evaluación posterior, afectando directamente la precisión del cálculo de profundidad.

Previo a la medición de profundidades, es necesario realizar una inspección no destructiva de descarte mediante la aplicación de partículas magnetizables. Este paso tiene como objetivo asegurar que el defecto sea de naturaleza puramente volumétrica, dado que la metodología PSQR no es aplicable a grietas, fisuras o fenómenos de corrosión bajo tensión (SCC). Dada la densidad de puntos necesarios para el cálculo de PSQR se continua el proceso de evaluación mediante un mapeo Laser 3D de alta resolución utilizando un escáner láser de grado metrológico. Durante esta fase, el técnico realiza un barrido completo de la anomalía para generar una nube de puntos con una resolución máxima de 5mm x 5mm, logrando así capturar la topografía completa de la colonia de corrosión y eliminando el error humano inherente al uso tradicional de puentes de profundidad manuales y calibres.



Figura 5 - Escaneo de defecto y armado de perfil

Ya relevada la indicación la nube de puntos se procesa mediante software de para generar una malla de profundidades. Este será la entrada para de cálculo aptitud para el servicio PSQR. La ventaja operativa de esta implementación es la obtención de resultados inmediatos en el frente de obra, permitiendo decidir sobre la necesidad de reparación antes de cerrar la zanja con un grado menor de conservadurismo.



Figura 6 - Proceso de escaneo

Si bien TC energy en conjunto con el Pipeline Research council (PRCI) llevaron adelante un proceso exhaustivo de validación del método, desde TGN se planteó la comparación de los resultados del PSQR con los métodos tradicionales frente la Presión Máxima de Operación (MAOP).

Para llevar a cabo esta validación se estudiaron un total de 44 anomalías reales, distribuidas en 4 cañerías, las cuales fueron evaluadas mediante escáner laser y calculadas por ASME B31G, ASME B31G

modificado, RSTRENG y PSQR. Los resultados obtenidos para cada una de las cañerías verificadas se expresan en la Tabla 1- Comparación de métodos

Método	FS Promedio	Desviación Estándar (Consistencia)	Interpretación
PSQR	1,73	0,079	Mayor precisión y estabilidad.
RSTRENG	1,71	0,098	Estándar actual, ligeramente más conservador.
B31G Mod	1,68	0,139	Conservadurismo medio.
B31G	1,55	0,154	Excesivamente conservador y disperso.

Tabla 1- Comparación de métodos

Para que un modelo de cálculo se considere bueno este debe tener baja dispersión, es decir ser predecible. La figura 7 muestra que PSQR presenta la menor desviación estándar (0,079), lo que confirma lo expuesto en la teoría: al filtrar el ruido del ILI, el modelo entrega resultados más coherentes y "plausibles" que B31G, B31G-Mod o RSTRENG.

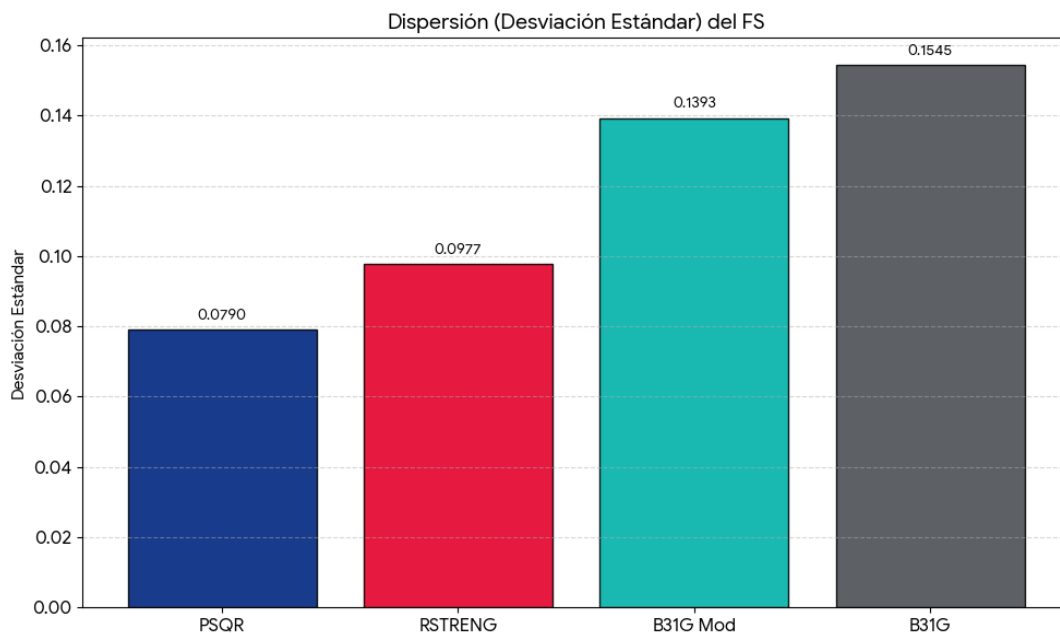


Figura 7 - Dispersión de métodos analizados

Se observa también una reducción importante del conservadurismo al calcular la presión de falla. La figura 8 compara el factor de seguridad de los distintos métodos evaluados. Puede visualizarse un “salto de calidad” del PSQR frente al resto. Los métodos B31G convencionales castigan la tubería severamente al presentar FS más bajos.

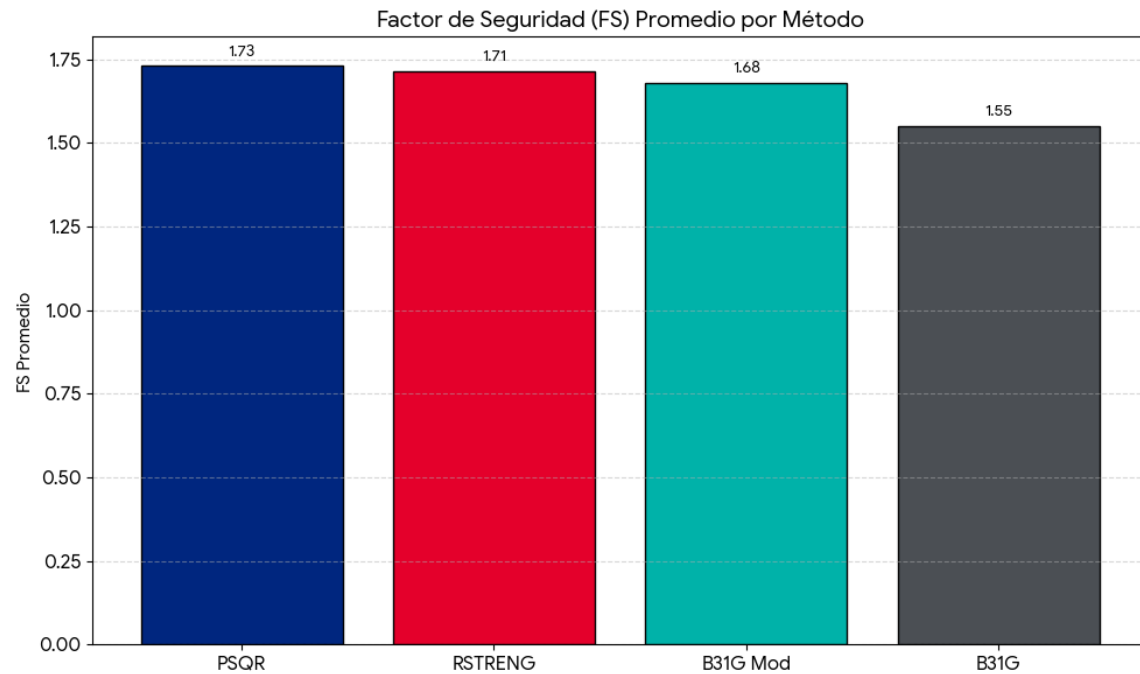


Figura 8 - Factor de seguridad promedio por método

Al comparar entre los métodos RSTRENG y PSQR (figura 8), ambos muestran una resistencia más precisa; sin embargo, este último optimiza los picos donde RSTRENG cae injustificadamente. Aquellos defectos con una orientación preferentemente axial se encuentran sobre la línea de simetría (línea de pendiente unitaria), indicando así que el resultado es el mismo para ambos métodos.

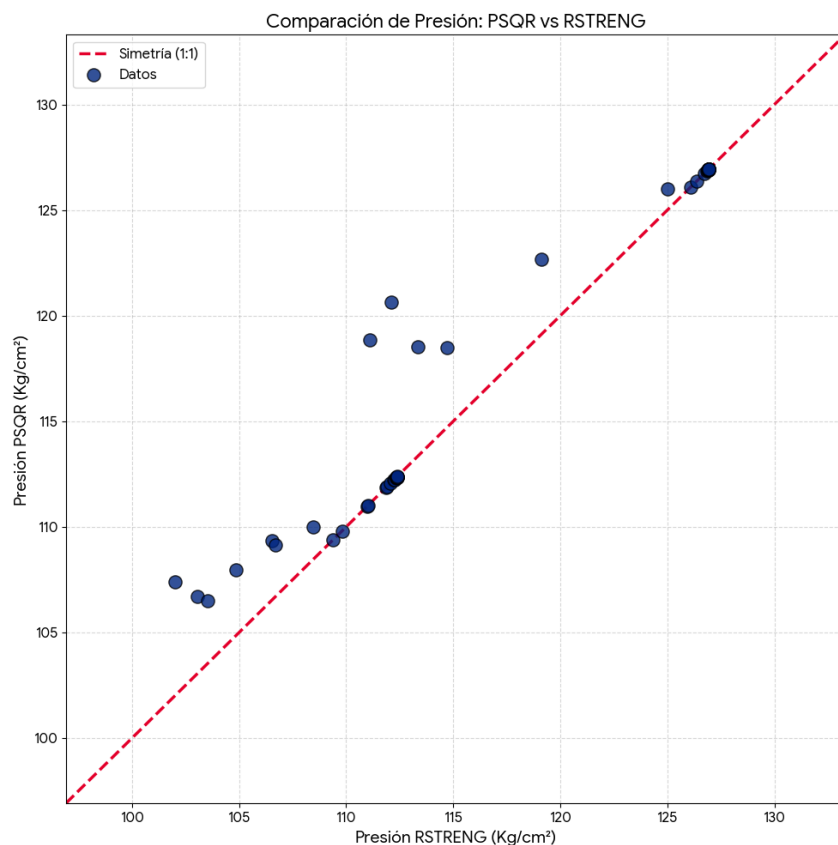


Figura 9 -Presión de falla PSQR .vs RSTRENG

Los resultados consolidados tras la aplicación del modelo en el sistema de TGN reflejan una optimización en la gestión de activos. El análisis se estructuró bajo tres pilares: precisión del modelo, eficiencia operativa e impacto económico.

La dispersión muestra que PSQR sistemáticamente obtiene valores de presión de falla más cercanos a la realidad, en el caso más conservativo o, en el caso más conservativo lo iguala frente al RSTRENG. En promedio, PSQR ofrece una mejora del 1,07%, con picos de recuperación de hasta 7,62% en defectos donde RSTRENG falló por interpretar ruido como daño real.

Al analizar en detalle las diferencias, se observa que aproximadamente el 70% de las muestras presentan un factor de forma axial $AFF = 1$. En estos casos, el cálculo de la presión de falla mediante el método PSQR incorpora un nivel adicional de conservadurismo, generando resultados equivalentes a los obtenidos con RSTRENG.

Para obtener un resultado más representativo de la mejora se analizaron en detalle aquellas anomalías cuyo perfil de corrosión no se encuentra alineado axialmente. Obteniéndose una mejora promedio en la presión de falla de 3,63% y hasta un máximo 7,64%.

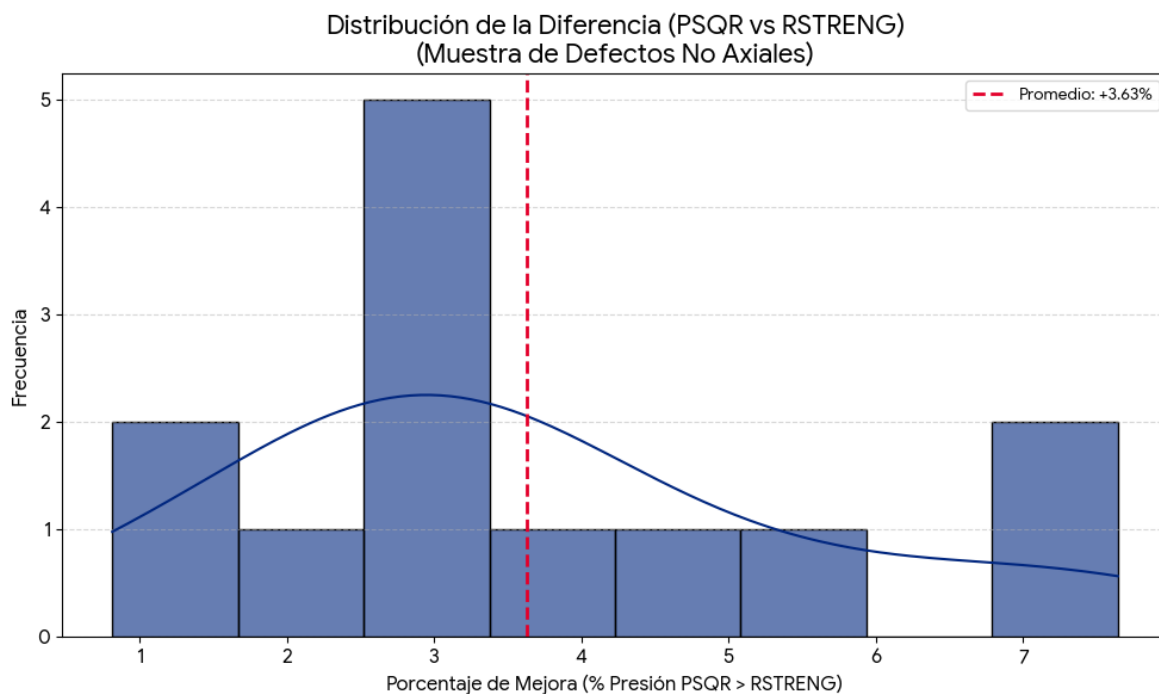


Figura 10 - Mejora porcentual entre PSQR y RSTRENG

Los resultados validan que el conservadurismo de RSTRENG se exagera ante defectos complejos (no axiales). La aplicación de PSQR en estos casos no implica reducir la seguridad, sino corregir un error de modelado geométrico. La recuperación del ~3,63% de presión promedio representa la eliminación del exceso de conservadurismo generado por la proyección axial simplificada de RSTRENG.

Para evaluar el impacto real de la implementación del método PSQR en la gestión de integridad, se desarrolló un caso de estudio aplicando la mejora obtenida con respecto a la presión de falla sobre 12 líneas de inspección operativas pertenecientes a los sistemas al sistema de TGN. El objetivo fue comparar la cantidad de pozos requeridos bajo dos criterios de seguridad, utilizando como referencia los resultados obtenidos con el método tradicional RSTRENG frente a los del modelo PSQR.

Este análisis no se limitó a una comparación teórica, sino que proyectó escenarios operativos concretos, considerando factores como:

- Criterio de aceptación de integridad ($FS < 1,4$): Estándar utilizado para definir verificaciones programadas.
- Distribución de defectos volumétricos: Basada en datos históricos de inspecciones internas y verificaciones en campo.
- Impacto logístico y económico: Número de excavaciones, costos asociados por pozo (estimados en 25.000 USD) y tiempos de impacto al transporte.

Los resultados evidenciaron una reducción sustancial en la cantidad de intervenciones cuando se aplica PSQR, descartando falsos positivos generados por el conservadurismo de RSTRENG. En términos prácticos, esto se traduce en campañas de verificación más eficientes, disminución del 93% en costos de

obra civil y optimización de recursos sin comprometer la seguridad del sistema.

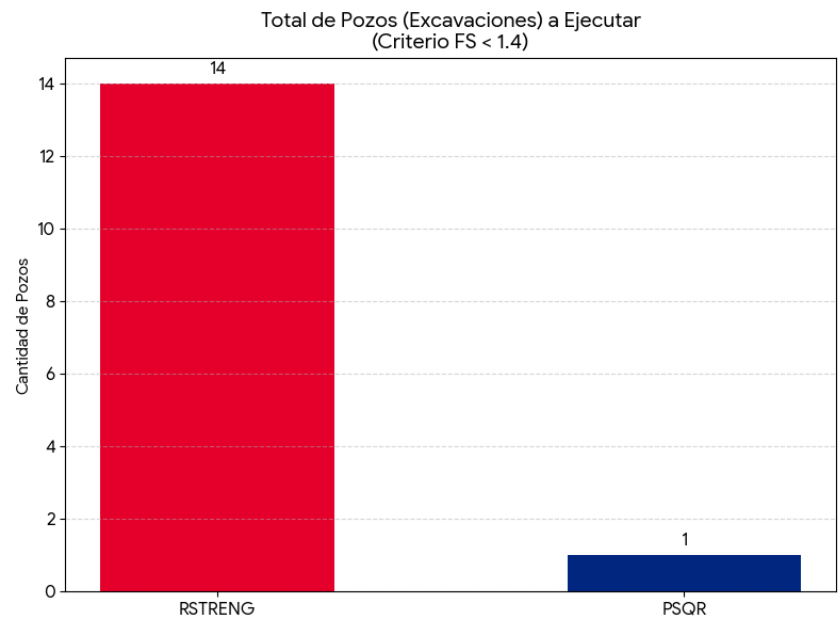


Figura 11 - Reducción en pozos de verificación

Adicionalmente como parte del proceso se analizaron un total de 604 verificaciones de defectos volumétricos ejecutados en los últimos años. En estos casos se comparó la cantidad de reparaciones necesarias por RSTRENG y por PSQR.

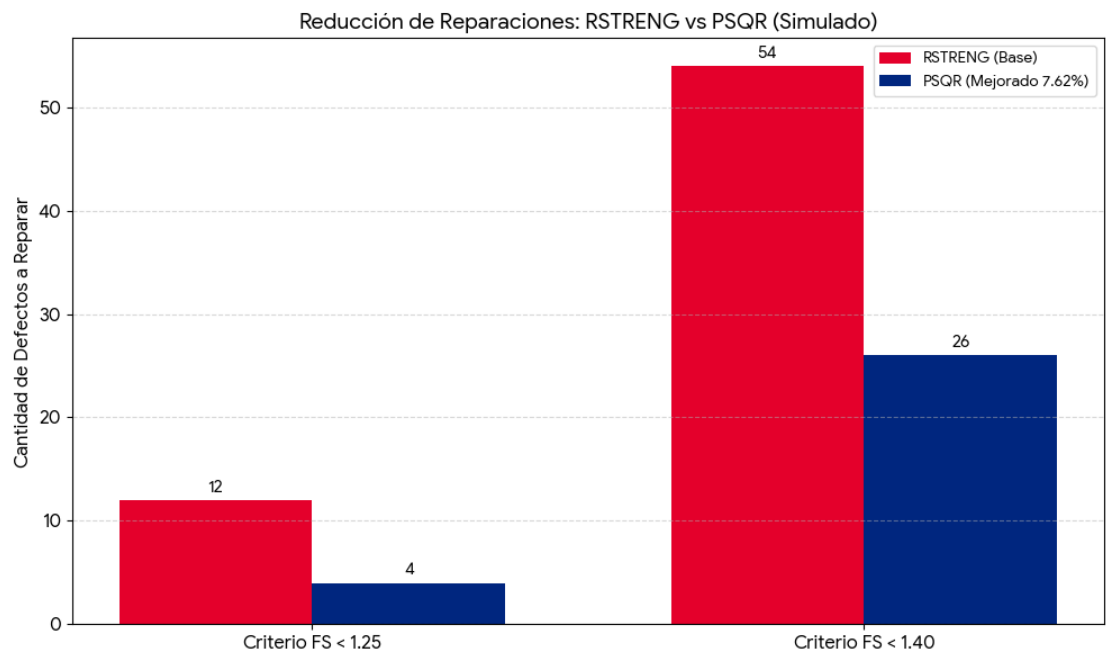


Figura 12 - Reducción en medidas de mitigación

RSTRENG indicaría reparar 12 defectos para mantener el Tramo analizado con un factor de seguridad mayor o igual a 1,25 veces la MAPO, mientras que PSQR demuestra que solo 4 defectos son realmente críticos. A medida que se elevan los valores del criterio de aceptación la brecha entre los métodos aumenta todavía más, requiriendo 54 y 26 pozos por RSTRENG y PSQR, respectivamente, para mantener un factor de seguridad mayor o igual a 1,4.

CONCLUSIONES

1. El método Plausible Profiles (PSQR) representa la evolución necesaria en la evaluación de corrosión, superando la limitación del perfil de fondo de río mediante un análisis tridimensional y probabilístico.
2. La incorporación del Factor de Alineamiento Axial (AAF) y el uso del Percentil 5 garantizan que el método sea robusto, conservador y seguro para su aplicación en gasoductos de alta presión.
3. Se puede evitar hasta el 93% de los costos de obra civil, permisos y tiempos de parada asociados a las excavaciones que RSTRENG marcaba erróneamente como necesarias.
4. La implementación en TGN ha demostrado beneficios tangibles: una reducción en excavaciones innecesarias y una mejora de hasta 67% en reparaciones estructurales, optimizando los recursos de mantenimiento y extendiendo la vida útil de los activos.
5. La precisión mejorada del método permite una gestión de integridad basada en evidencia técnica rigurosa, alineada con los estándares internacionales de Nivel 2B.

PRÓXIMOS PASOS

Para consolidar la adopción definitiva del método y validar su comportamiento en las condiciones específicas de la red de transporte local, TGN ejecutará un programa integral de validación empírica incluyendo los siguientes puntos:

- Ejecución de Ensayos a Rotura a Escala Real (Full-Scale Burst Tests): Se recolectarán muestras de cañerías retiradas de servicio con defectos de corrosión real ("probetas"). Estas piezas serán soldadas a cabezales de prueba de alta presión y sometidas a presurización hidrostática hasta alcanzar la rotura.
- Instrumentación y Registro de Datos: Las probetas contarán con sensores de presión y galgas extensométricas (strain gauges) conectadas a sistemas de adquisición de datos de alta frecuencia. Se registrará la curva Presión vs. Tiempo para analizar la progresión de la deformación elasto-plástica en la zona del defecto hasta el momento de la falla.
- Análisis Comparativo Post-Ensayo: Tras la rotura, se contrastará la presión de rotura experimental contra las predicciones teóricas de B31G, RSTRENG y PSQR. El objetivo es documentar la reducción real del sesgo y validar estadísticamente que el Percentil 5 de PSQR se mantiene siempre del lado seguro.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASME B31G: Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines.
2. PRCI Catalog No. PR218-183607-R01: Peer Review of the Plausible Profile (PSQR) Corrosion Assessment Model (2019).
3. Technical Report PSQR: TransCanada Pipelines Limited / PRCI (April 2020).

BREVE CV

Alan Cornejo

Ingeniero Mecánico, graduado de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN FRBA), con más de 11 años de experiencia en la industria del petróleo y gas. Desde 2015, me he dedicado a tareas relacionadas con la gestión de inspecciones internas, la definición de verificaciones en campo, el análisis de aptitud para el servicio y la implementación de medidas de mitigación.

Matias Vigliano

Ingeniero en Materiales, graduado del Instituto Sabato (CNEA), con Maestría en Ingeniería Estructural Mecánica (UTN) y especialización en gestión. Cuento con cerca de 18 años de experiencia en los sectores nuclear y de transporte de gas. Desde 2008, me he dedicado a la tecnología de materiales, la inspección de componentes mecánicos y, actualmente, a la gestión de integridad de activos.

Santiago Parodi

Ingeniero en Materiales, graduado de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), con más de 8 años de experiencia en la industria del gas y petróleo. Desde 2017, me he dedicado a tareas de gestión de integridad de ductos, inspección basada en riesgo (RBI) y aptitud para el servicio y mitigación de defectos.