

ESTRATEGIAS NOC PARA MECANISMO DE DAÑO POR EROSIÓN

Iván Barrientos, Tecpetrol, ivan.barrientoscabrera@tecpetrol.com
Sebastián Chevalier, Tecpetrol, sebastian.chevalier@tecpetrol.com
Marcelo Cañaveras, Tecpetrol, marcelo.canaveras@tecpetrol.com

Sinopsis

Los nuevos sistemas de extracción No Convencional de los pozos de gas en conjunto con el desafío constante de asegurar la integridad de los sistemas que contienen energía, y por ende el flujo de producción conocido también como *flow assurance*, nos han impulsado al desarrollo y análisis de riesgo donde se refleja el conocimiento pasado, actual y futuro de cada sistema. Así se combinan decisiones estratégicas de extracción, caudales de producción, presiones de boca de pozo, tasas de separación de arena, estados de evolución de pozos, construcción de las facilidades instaladas desde el diseño y las nuevas.

Como parte del proceso de Gestión de Integridad implementado en Tecpetrol S.A. se realizó en 2019 un análisis de riesgo base para el sistema de producción de los pozos (PAD) mediante un modelo cuantitativo. Dicha evaluación permitió identificar las amenazas principales y definir las acciones del programa de inspección, monitoreo y mitigación basadas en riesgo. A partir de una falla ocurrida en el 2023, el sistema se reevaluó y también el plan original, dando origen a un plan de segunda generación, basado en la revisión de los mecanismos de daños propuestos en el estudio de riesgo, combinando más herramientas de análisis, como simulaciones por elementos finitos, uso de ecuaciones distintas a API 14E, migrando a los modelos de Salama y DNV (*Det Norske Veritas*) para calcular velocidades de erosión. Así se cambiaron y combinaron técnicas de inspección específicas para el mecanismo de daño encontrado. La necesidad de re inspeccionar más de 180 pozos en producción, se combinó con la metodología utilizada en el seguimiento de la gestión, revaluando resultados y actualizando al modelo de análisis de riesgo cuantitativo. Con las metodologías de cálculo de probabilidad, consecuencia y riesgo, el modelo cuantitativo se basa en probadas normativas y publicaciones internacionales, principalmente API RP 581 (Inspección basada en riesgo). Dando origen al Plan de Inspección de tercera generación, que combina una nueva técnica para visualizar y validar la presencia del mecanismo de daño presente en forma instantánea.

1. Introducción

El presente trabajo muestra la estrategia de adaptación en los nuevos sistemas de producción en la extracción No Convencional de los pozos de gas, sumados al desafío constante de asegurar la integridad de los sistemas que contienen energía, y por ende el flujo de producción conocido también como *flow assurance*. Se plantea cómo los cambios de escenarios en el sistema nos han impulsado al desarrollo y análisis de riesgo donde se refleja el conocimiento pasado, actual y futuro de cada sistema. Combinando las decisiones estratégicas de la producción, caudales, presiones de producción, tasas de producción de arena, edades de producción, también las facilidades instaladas desde el diseño. El rediseño de planes de inspección y como objetivo final. Estudio del sistema en función del mecanismo de daño, uso de herramientas de cálculo para simulaciones, cálculos de riesgo (API 580), aplicación y combinación de varias tecnologías de inspección.

2. Objetivos

Mejorar el proceso de Gestión de Integridad implementado, que comprende un análisis de riesgo base para el sistema de producción de los pozos (PAD) mediante un modelo cuantitativo. Dicha evaluación permitió identificar las amenazas principales y definir las acciones del primer plan de inspección, monitoreo y mitigación basadas en riesgo. de una instalación mediante una metodología cuantitativa se desarrolló con los siguientes objetivos:

- Revisar los procesos y los mecanismos de daños propuestos en el estudio de riesgo y verificar los beneficios obtenidos por la implementación de las acciones iniciales.
- Optimizar y verificar la revisión de los mecanismos de daños propuestos en el estudio de riesgo, combinando más herramientas de análisis, cómo simulaciones por elementos finitos, uso de ecuaciones distintas a API 14E, migrando a los modelos de Salama y DNV (*Det Norske Veritas*) para calcular velocidades de erosión.
- Mejorar la orientación de recursos, así se cambiaron y combinaron técnicas de inspección específicas para el mecanismo de daño encontrado. La necesidad de re inspeccionar más de 120 pozos en producción, se combinó con la metodología utilizada en el seguimiento de la gestión, revaluando resultados y actualizando al modelo de análisis de riesgo cuantitativo.
- Anticipar probables fallas usando el sistema de gestión de integridad y software de cálculo de riesgo.
- Determinar nuevas frecuencias de inspección, y ventanas de servicio, a elementos específicos del sistema.
- Consolidar y validar las metodologías de cálculo de probabilidad, consecuencia y riesgo, el modelo cuantitativo se basa en probadas normativas y publicaciones internacionales, principalmente API RP 581 (Inspección basada en riesgo). Dando origen al Plan de Inspección de tercera generación, que combina una nueva técnica para visualizar y validar la presencia del mecanismo de daño presente en forma instantánea.

3. Desarrollo

3.1. El proceso de gestión de integridad

3.1.1. Propósito

El programa de gestión de integridad es un medio para incrementar la seguridad de los sistemas de cañerías y equipos que contienen energía:

- Identificando y analizando potenciales eventos que pueden resultar en incidentes.
- Evaluando la probabilidad y potencial severidad de dichos incidentes.
- Brindando un proceso estructurado e integrado para evaluar el espectro de riesgos y seleccionar las alternativas de acciones de reducción.

3.1.2. Principio

- Establecer un sistema de evaluación y la mejora progresiva de desempeño.
- La integridad debe implementarse desde las fases de planificación, diseño y construcción.
- El sistema de gestión de integridad abarca personal calificado y procesos definidos para operar y mantener las facilidades.
- Tener flexibilidad, adaptación a cada necesidad, evaluación y modificaciones ante cambios en los sistemas.
- Integrar la información.
- Analizar y evaluar de riesgo: elemento clave para el proceso continuo.
- Implementar de acciones de control y mitigación.



Ilustración 1 – Propósito y principio

3.2. En PAD de producción - Análisis de Inspección Basada en Riesgo (RBI)

3.2.1.Descripción.

Para calcular y diseñar un programa de inspección basado en riesgo, se realizaron los pasos descritos en el punto 3.1, así se recopiló de información y se revisó el proceso y las condiciones de operación de las unidades y componentes, se revisaron de factores de producción. Se incorporaron los análisis de los equipos estáticos y las líneas al análisis. Cada PAD se incorporó al análisis y se actualizaron los mecanismos de daño. Con la tecnología de API 580/API RP.581, se realizaron los cálculos de probabilidad y consecuencia de falla. Así como también se calcula del riesgo cuantitativo (API RP-581 2016). Definido esto, surge el diseño del plan de inspección basado en riesgo y planes complementarios.

A modo ilustrativo (ver ilustración 2) se muestra la implantación. Taxonomía. Cálculo de riesgo de un PAD, en el software para gestión de riesgo de equipos.



Ilustración 2 - Taxonomía

Del estudio de riesgo, surgen 2 documentos fundamentales, el plan de inspección y en el plan de monitoreo.

En la ilustración 3, se muestra el esquema típico del sistema de instalación en los PAD. Los colores identifican cada uno de los denominados “Loops” o “Circuitos” que comparten similitudes de productos, presiones, caudales, temperatura, fluidos, y por lo tanto mecanismos de daño.

Esquema – Típico en PAD

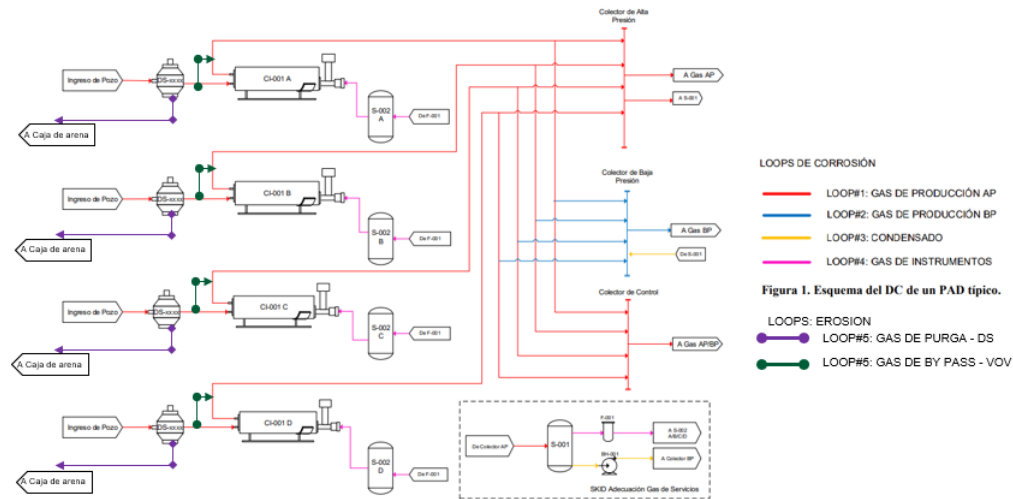


Ilustración 3 – Esquema – Típico de PAD

Del análisis de riesgo RBI, cada componente evaluado, posee un riesgo calculado o teórico que luego deberá ser evaluado al implementar el plan de inspección.

Riesgo

- El riesgo se calcula como el producto de la probabilidad de falla (fallas/año) por la consecuencia (U\$/falla). El resultado de riesgo para los equipos y cañerías evaluados se presenta la matriz cualitativa (ilustración 4).
- A partir de los resultados obtenidos en el análisis de riesgo se establecen los programas inspección y monitoreo basados en riesgo

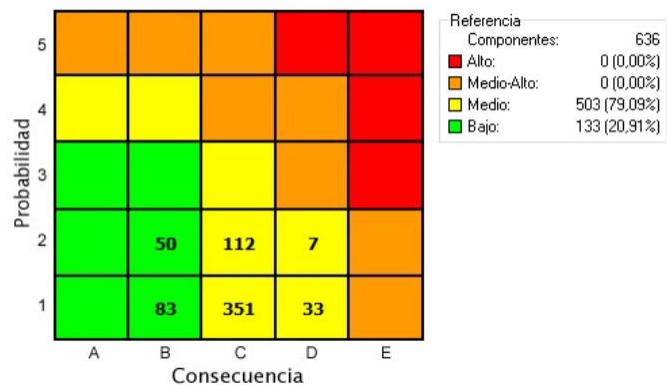


Ilustración 4 – Matriz de Riesgo en costo (USD/año) de Instalaciones PAD

3.3. Caso de Análisis PAD

Rotura en accesorio Tee normal en cañería de ingreso a calentador de pozos que se encuentran en su curva de producción más agotada. La rotura se ubica en una zona no usual. La introducción de este accesorio a la cañería no pertenece al diseño original. La incorporación de este accesorio se debe a la necesidad operativa cuando no se requiere el uso del calentador. La Tee normal, se usa como derivador de flujo hacia un CPO (caja porta orificio), donde se produce la expansión del gas pasando de alta presión (100 – 200 kgr/cm²g) a baja presión (6 – 13 kgr/cm²g) y así conducirse a los colectores de producción de gas.

Los pozos en producción No Convencional de Fortín de Piedra se los puede agrupar en función de su periodo de producción y acorde a las necesidades de producción y entrega.

Los pozos nuevos cuentan con un potencial de producción de 700 Msm³/d; con una presión en boca de pozo entre 300 – 400 Kgr/cm²g. Con facilidades como desarenadores esféricos tipo ciclónicos, en este periodo se extrae cantidades de arena del orden de los 100 kgr/d.

Los pozos jóvenes con un potencial de producción 400 Msm³/d, presión de boca de pozo entre 150 – 300 kgr/cm²g. Aquí pueden encontrarse 2 o más pozos compartiendo un mismo desarenador y calentador, la producción de arena se encuentra en 50 kgr/d.

Los pozos maduros con un potencial de <200 Msm³/d, presión de boca de pozo <150 kgr/cm²g, Instalaciones que ya no poseen desarenadores, 2 o 3 pozos comparten un mismo calentador y las producciones de arena son menores a 20 kgr/d

3.3.1.Descripción del proceso y bypass

Los procesos realizados en un PAD consisten principalmente en la recepción de gas de producción no convencional proveniente de pozos, reducción de la presión y calentamiento para su envío a baterías. Las instalaciones de los diferentes PAD son similares, contando cada uno con el ingreso de hasta 4 pozos productores. En este PAD se instaló una línea de bypass del calentador, a partir de la caída de presión de los mismos. La línea de bypass se acopla mediante una tee por la que circula la producción de 1 o varios pozos, dejándose el calentador. En el esquema de la ilustración 5 se presenta un detalle del diagrama de mecanismos de daño en la zona de la tee analizada, así como una imagen de la línea y el accesorio en la planta (ilustración 6).

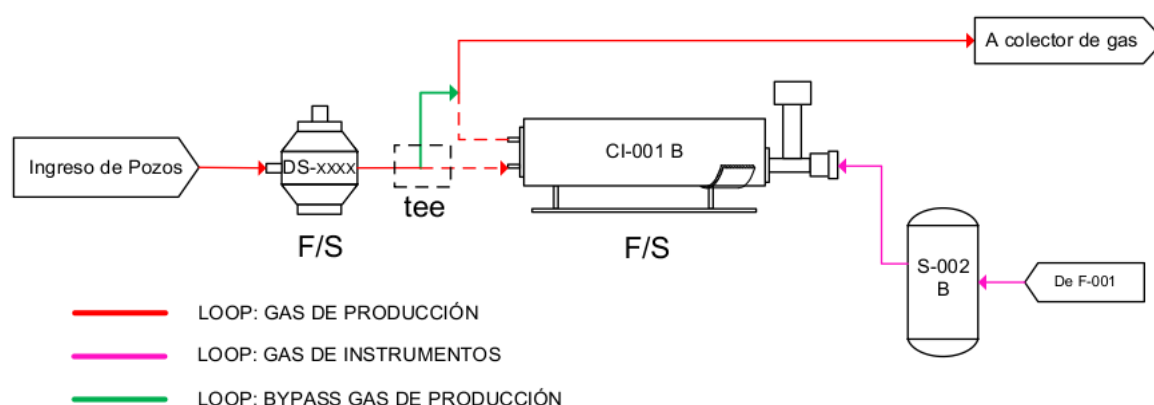


Ilustración 5 - Diagramas de mecanismos de daño en la zona de la tee analizada



Ilustración 6 – Vista de instalación – By pass de calentador

3.3.2.El análisis de falla

El análisis de falla condujo a buscar las causas de la rotura. Para caracterizar la falla se utilizó el método de radiografía de perfil, por gammagrafía digital aplicada a la pieza dañada y los accesorios más cercanos, como codos de impacto de ingreso a calentador, y los codos de impacto de salida de calentador inmediatamente aguas abajo de los codos de impacto. Ilustraciones 6, 7 de la tee y 8,9 su daño de erosión al liberarse la energía.



Ilustración 7 - Rotura en Tee



Ilustración 8 – Vista con arena



Ilustración 8 – Daño por acción de erosión



Ilustración 9 – Acción de erosión

El hallazgo del daño de erosión en la tee, conduce a revisar y re evaluar el plan de inspección del original o fase 1. En la imagen se ven los perfiles de la cañería conservados y sin evidencia de erosión, en el accesorio tee se ve una notable reducción de la sección interna por el tipo de accesorio instalado que disminuye el área interna (ilustración 10) y en el cuello de la salida del codo de impacto donde el flujo luego se dirige a la tee de By-pass o ingreso al calentador (ilustraciones 11 y 12).

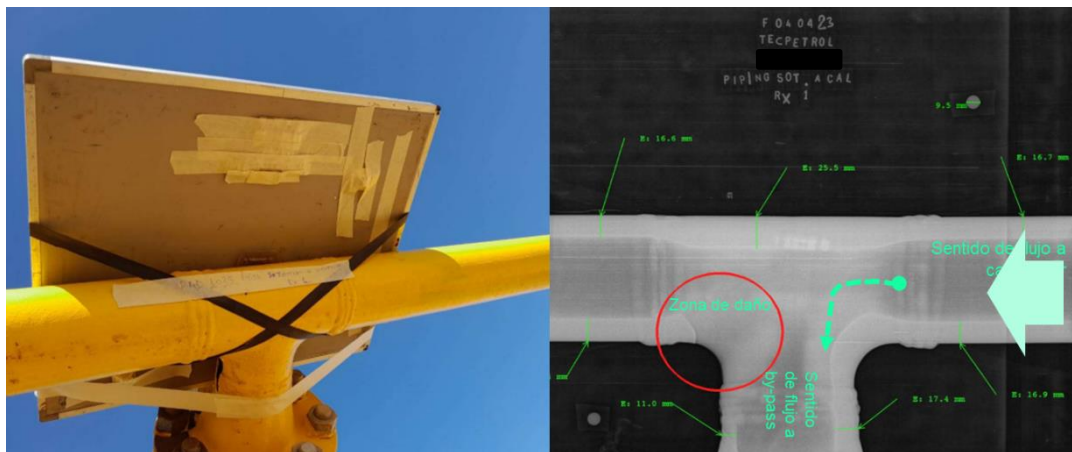


Ilustración 10

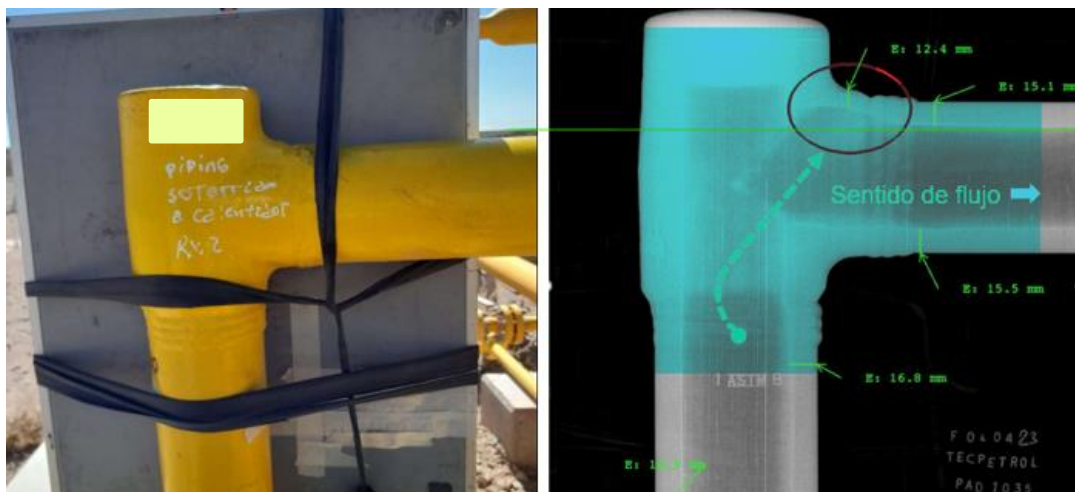


Ilustración 11 – Codo de impacto dirección de flujo a calentador y tee by-pass

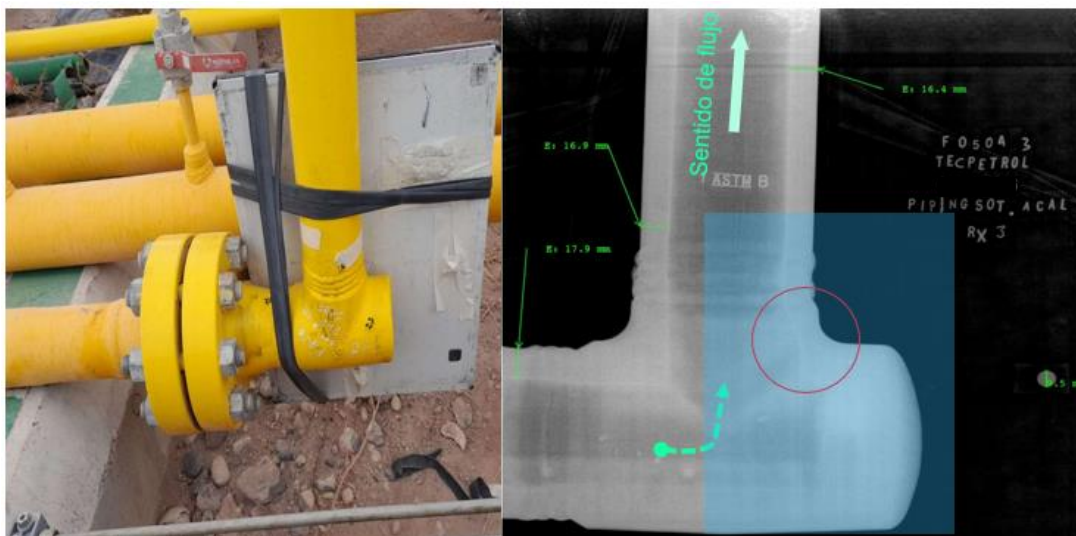


Ilustración 12 – Desde desarenador a Codo impacto

Los ensayos en laboratorio en la muestra de la tee seccionada y tratada con arenado de inspección, revelan el patrón de desgaste por la erosión (causado por la alta diferencial de presión) en las zonas de ingreso y salida de la tee, mientras que las paredes de la cañería recta se mantienen conservadas (ilustración 13).

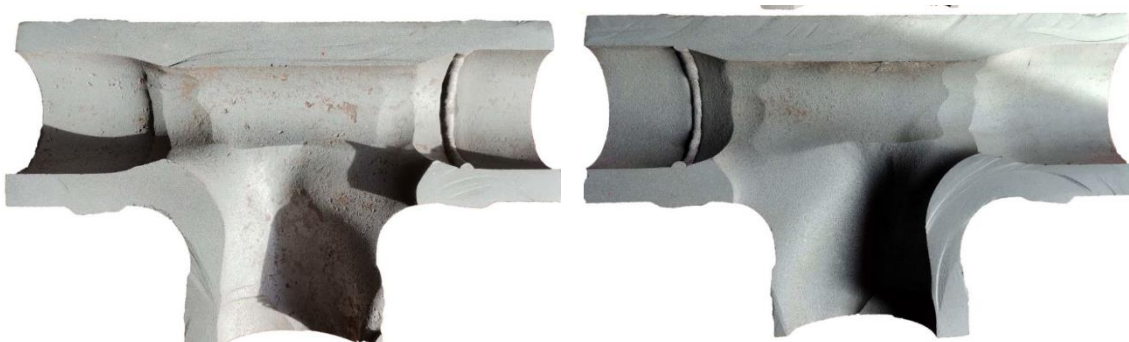


Ilustración 13

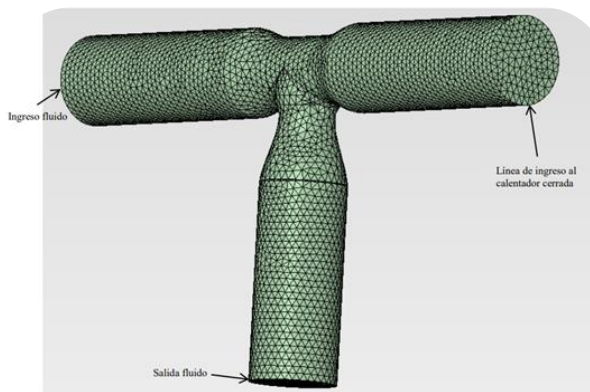
3.3.3. Estableciendo los límites de análisis

Verificación de las variables de operación de la instalación (ilustración 14). Mediante el uso de la herramienta scada PI Vision (ilustración), se analizaron los históricos de presión de boca de pozo (aguas arriba de la falla), presión de línea (aguas debajo de la falla), caudal producido. Tiempo de servicio de la instalación, funcionando en alta presión, media presión, baja presión, con desarenador y sin desarenador. El acumulado de producción de arena, tipo y granulometría de la arena, fue también considerado. Se planeo utilizar simulación por elementos finitos, y caracterizar en laboratorio la morfología de la falla (ilustración 13).

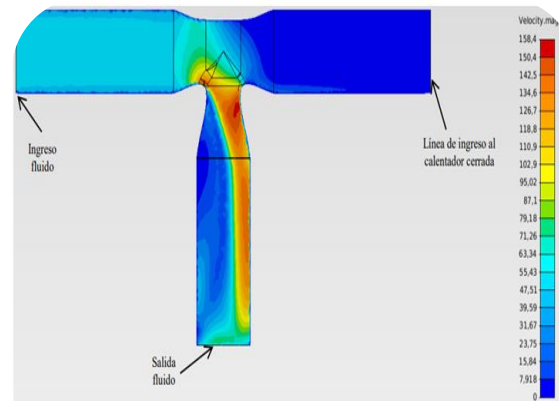


Ilustración 14 – Pantallas de registros PI Vision – Análisis de variables

Es así como se realizaron simulaciones de flujo para la tee del by pass, considerando las condiciones operativas tomadas para los modelos de erosión. El objetivo de este modelado fue obtener patrones de flujo y velocidades de fluido en una geometría similar a la real, para compararlo con lo observado mediante las inspecciones radiográficas.



Mallado



Modelado de flujo

Ilustración 15 Simulación de flujo con daño observado en tee de bypass

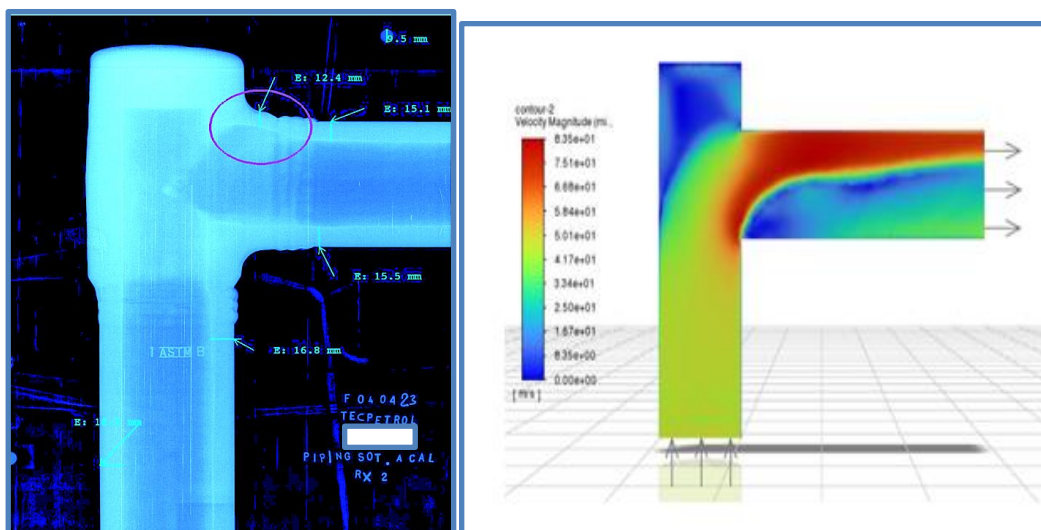


Ilustración 16 Comparativa de simulación de flujo con daño observado en codo de impacto

3.3.4. Definiendo el alcance de las acciones.

Conociendo el tiempo de puesta en servicio con las configuraciones en los PAD mencionadas en 3.3.3., se estableció el orden de prioridad para ejecutar la re-inspección a las instalaciones de los PAD que presentaran similares condiciones y se realizó un ordenamiento y clasificación de los 120 pozos distribuidos en 42 PAD en producción y en sus distintas etapas de producción (gráfico 1, 2 y 3).

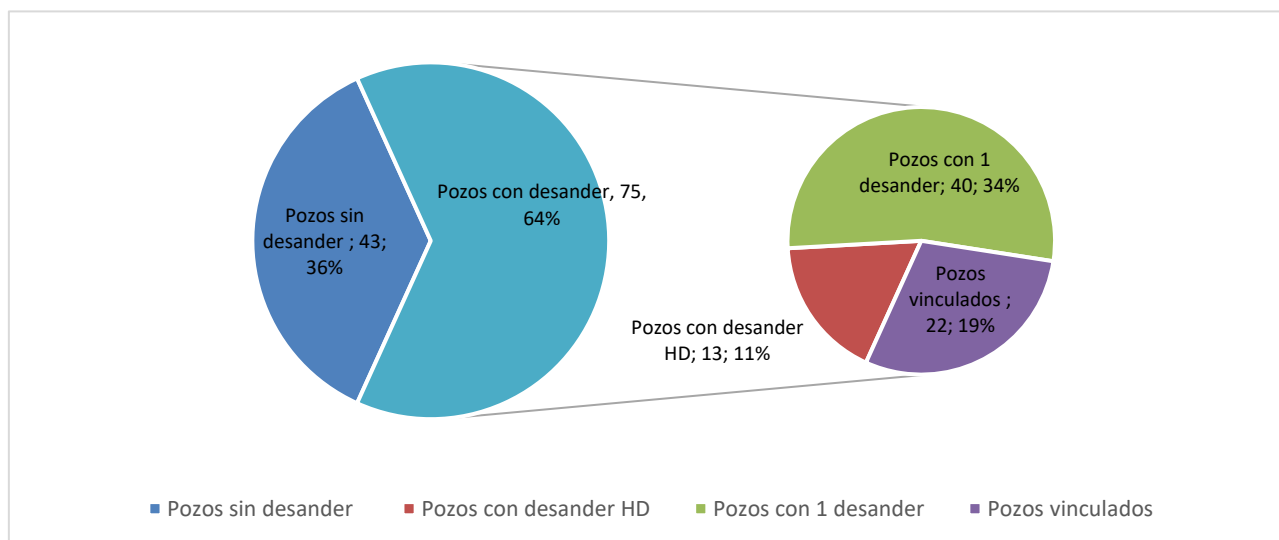


Gráfico 1 Distribución de pozos con sus distintas configuraciones



Gráfico 2 . Clasificación por mayor tiempo en servicio sin desarenador y con by pass instalado

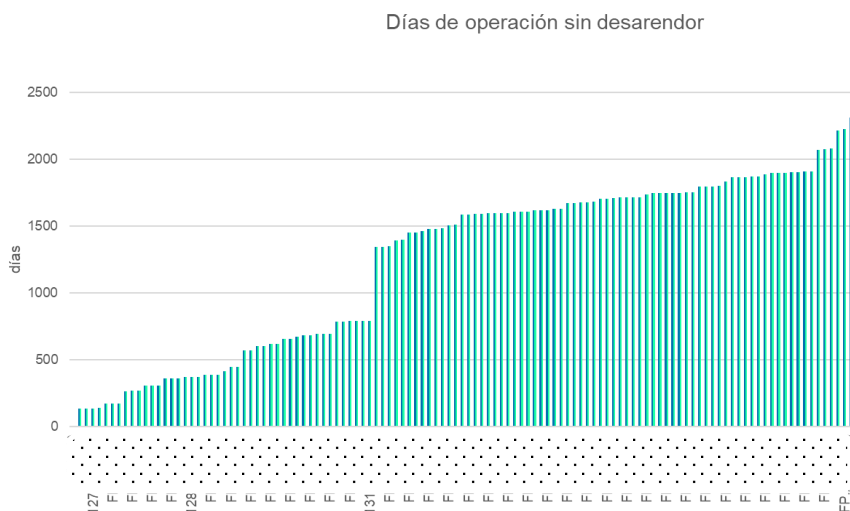


Gráfico 3 Clasificación por mayor tiempo en servicio sin desarenador descargando a captación de baja presión

3.3.5. Análisis erosional

Se evaluó en conjuntamente el historial de operación del bypass del calentador y las inspecciones radiográficas realizadas, en base a lo cual se estimó una velocidad de erosión promedio en la zona con mayor pérdida. El valor medido es de 5,35 mm/año (210,63 mpy). Es esperable que haya habido variaciones durante toda la operación de la tee, teniendo en cuenta los cambios en caudales producidos, presiones de operación y contenidos de arena.

Usando los caudales y condiciones de operación, se estimó las velocidades de erosión por los modelos de Salama y DNV para un codo de impacto (ecuaciones 1 y 2). Los valores resultantes son 3 y 6 veces menores que la velocidad medida en la tee del bypass, respectivamente.

Se establecieron factores de corrección geométricos para predecir las velocidades de erosión a partir de los modelos erosivos en un codo de impacto.

Se evaluó que, dependiendo de la constante “C” que se utilice, mediante el modelo de API 14E el caudal actual puede o no ser aceptable. Al contrastar esto con las pérdidas severas observadas mediante las radiografías de perfil, esto muestra una limitación en la aplicación de este criterio para definir las condiciones operativas.

Mediante el modelado de flujo, se halló una correspondencia entre las zonas con altas velocidades y aquellas con mayores pérdidas medidas. Se observó también que los valores locales de velocidades en estas zonas son muy elevados en las condiciones en que opera el accesorio.

Se concluye que las velocidades de erosión presentes en la tee y la erosión incipiente del codo de impacto se debe a una combinación de los siguientes factores:

- o Elevado caudal de operación (producción de los 3 pozos) la fase gas
- o Contenido de arena presente
- o Existencia de zonas puntuales con alta velocidad por las condiciones geométricas particulares de los accesorios.

$$ER = \frac{1}{S_m} \cdot \frac{W \cdot V_m^2 \cdot d}{D^2 \cdot \rho_m}$$

Donde:

ER: velocidad de erosión

S_m: constante dependiente de la geometría

W: caudal de arena

V_m: velocidad de la mezcla

d: tamaño de partículas

D: diámetro interno

ρ_m: densidad de mezcla

Ecuación 1 Modelo de Salama

$$E_L = \frac{m_p \cdot K \cdot (U_p)^n}{\rho_t \cdot A_t} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit}$$

Donde:

E_L: velocidad de erosión

m_p: caudal de arena

K: constante del material

U_p: velocidad de impacto de partículas (equivalente a velocidad del fluido en este modelo)

n: exponente de velocidad

G: función de corrección de tamaño de partículas

C₁: factor de geometría/modelo

C_{unit}: factor de conversión de unidades

Ecuación 2 Modelo de DNV

En ambos modelos, las variables de operación influyen sobre la velocidad de erosión del siguiente

- Caudal de arena: dependencia lineal directa. Duplicar el contenido de arena, duplica la velocidad de erosión.
- Caudal de gas y líquido: dependencia potencial directa, por influir en la velocidad de la mezcla:
 - o Salama: potencia cuadrática; duplicar el caudal genera una velocidad de erosión 4 veces mayor.
 - o DNV: exponente de 2,6; duplicar el caudal genera una velocidad de erosión 6 veces mayor.
- Presión de operación: dependencia potencial inversa, por influir en la velocidad de la mezcla (volumen del gas):
 - o Salama: potencia cuadrática; reducir la presión a la mitad genera una velocidad de erosión 4 veces mayor.
 - o DNV: exponente de 2,6; reducir la presión a la mitad genera una velocidad de erosión 6 veces mayor.
- Temperatura de operación: dependencia directa, por influir en la velocidad de la mezcla (volumen de gas): dependencia con temperatura absoluta (K).
- Diámetro interno de la cañería: dependencia cuadrática inversa; reducir el diámetro a la mitad genera una velocidad de erosión 4 veces mayor.

Se debe aclarar que ninguno de los 2 modelos considera una geometría como la estudiada. Los cálculos se realizaron para una tee reforzada, y los resultados son los siguientes:

Modelo	VE [mm/año]	VE [mpy]
Salama (codo de impacto)	1,74	68,5
DNV (codo de impacto)	0,93	36,6

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}}$$

Ecuación 3 Modelo de API 14E

C	Verosional (m/s)
100	31,6
150	47,5
200	63,3

Table 1: Suggested *c*-factors by the API RP 14E for Eq. (1)¹⁰

Fluid		Suggested <i>c</i> -factor	
		Continuous service	Intermittent service
Solids-free	Non-corrosive	150-200	250
	Corrosive + inhibitor		
	Corrosive + CRA*	100	125
Corrosive ⁷			
With solids		Determine from specific application studies	

Se observa que la dependencia con la constante definida es muy alta; si se considera un valor de 150, la velocidad actual estaría en el límite de lo aceptable, y al tomar C=200 entraría en el rango aceptable. Esto muestra una limitación en la aplicación de este criterio para definir las condiciones operativas, teniendo en cuenta la severidad del proceso erosivo observada en la tee.

Como se indica en diversos trabajos publicados en organismos de reconocida trayectoria (NACE-National Association of Corrosion Engineers, Ohio University, etc.) el modelo API 14E se utiliza ampliamente con factores C arbitrarios para sistemas fuera del alcance de la publicación original. Adicionalmente no considera parámetros determinantes como las propiedades del material, geometría, tipo de flujo, contenido de arena y corrosividad del fluido. Mediante ensayos, se ha demostrado que la velocidad erosional determinada por API

14E resulta imprecisa y en numerosos casos no conservativa, sometiendo a los sistemas a velocidades de erosión excesivas. El modelo API 14E no es adecuado para evitar velocidades de erosión elevadas.

3.3.5.1. Comparación de velocidades medidas y estimadas

A partir de lo modelado y lo observado en los primeros resultados de las re-inspección, es posible comparar los resultados y establecer un factor de ajuste para la geometría bajo estudio, con el objetivo de implementarlo a futuro en otras tees en condiciones similares.

Considerando:

$$VE_{medida} = f \cdot VE_{modelada \text{ en codo}}$$

Siendo:

- VE: Velocidad de erosión medida por gammagrafía
 - VE: Velocidad de erosión de modelos en codos de impacto
 - f: factor de ajuste geométrico
- Se pueden calcular los siguientes factores:

Modelo	VE [mm/año]	VE [mpy]	f (factor de ajuste)
DNV	0,93	36,6	5,8
Salama	1,74	68,5	3,1
Medida	5,35	210,6	-

3.3.5.2. Efecto del tamaño de partícula presión y cambio de sección en la velocidad de erosión

El análisis en particular para el efecto que pueden producir las variables como tamaño de partícula y el aumento de velocidad por cambio la sección, fueron calculados con las ecuaciones 1 y 2 y analizados para una presión de operación 9, 12, 25 y 45 kgr/cm2, con un tamaño de partícula de 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.02 mm y caudales de arena 1, 5, 10, 15, 20 kg/d, y así se calcula la pérdida de espesor en mm/año para cada condición planteada. Pudiendo graficar la tendencia para cada escenario. Encontrándose de esta manera que a menor tamaño de partícula, presión más baja (mayor velocidad a la que evolución el sistema), mayor tasa de caudal de arena circulante produce el mayor desgaste del espesor del accesorio evaluado, es decir mayor VE.

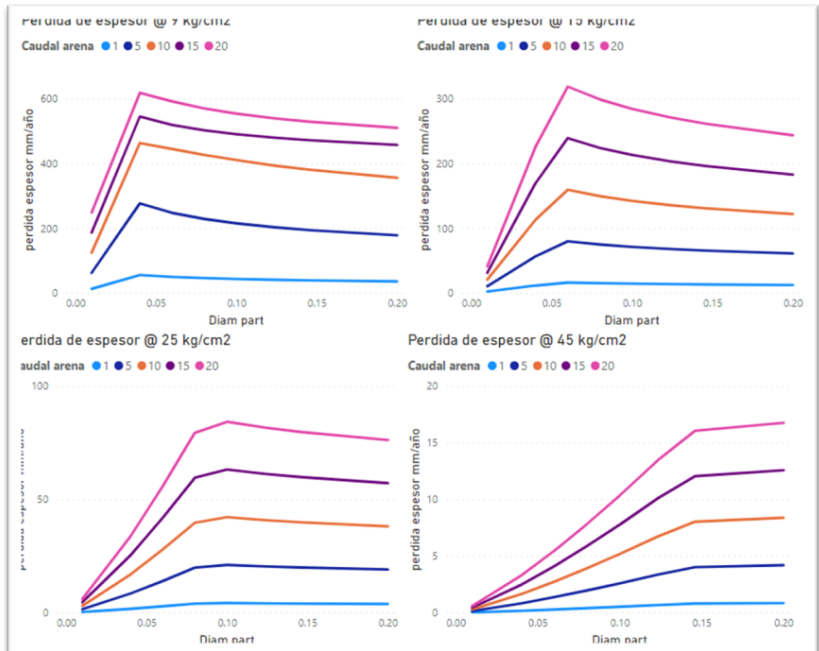


Ilustración 17 Efecto del tamaño del tamaño de partícula y presión

Para el cambio de sección, es decir la entrada al accesorio tee, donde se ve reducida la sección con respecto a la cañería recta, o bien el pasaje de una sección de 3" a 4", por un cambio en la configuración de la cañería instalada, resulta el siguiente cálculo para cada sección. Así se ve que un fluido de las condiciones analizadas en el documento puede generar un cambio en la velocidad de erosión en 1 orden de magnitud de 1×10^1 . Ver Gráficos 4 y 5.

Es decir, cuando el fluido pase por una sección mayor desde una sección menor, experimentará un descenso en la erosión, a igual presión final. Las ecuaciones a DNV y Salama con el factor f de corrección se hacen similares a baja velocidad erosional y presiones por encima de 100 kgr/cm² (alta presión).

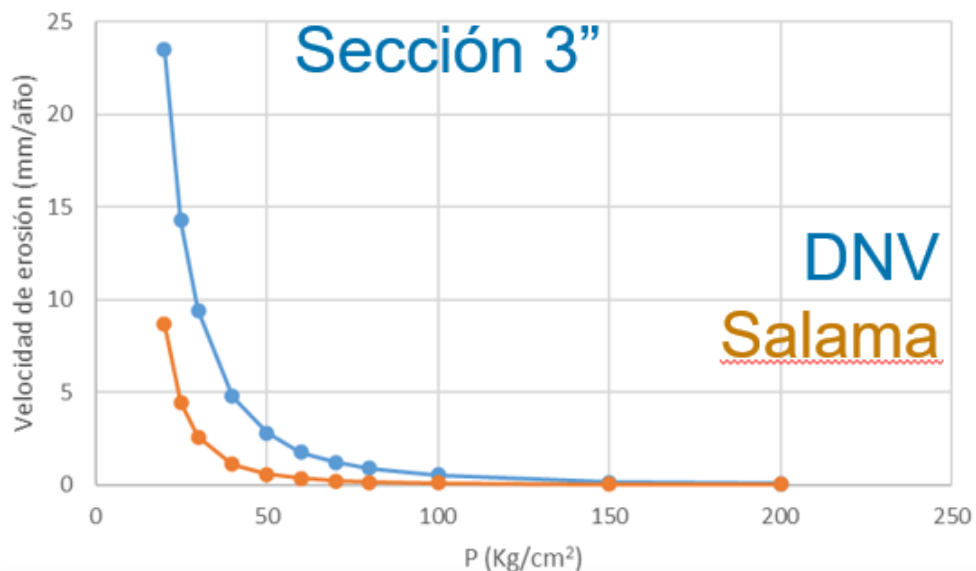


Gráfico 4

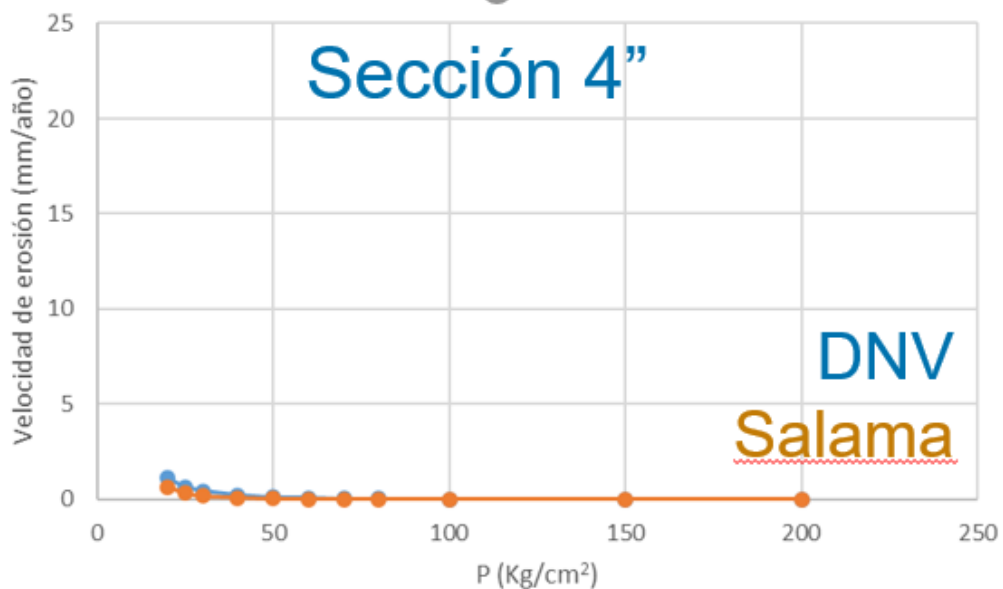


Gráfico 5

3.4. Gestión del plan de integridad PAD – Plan de inspección

A continuación, en la ilustración 18, se muestra el diagrama de flujo conceptual de la puesta en práctica del nuevo modelo de gestión del Plan de Integridad de PAD.

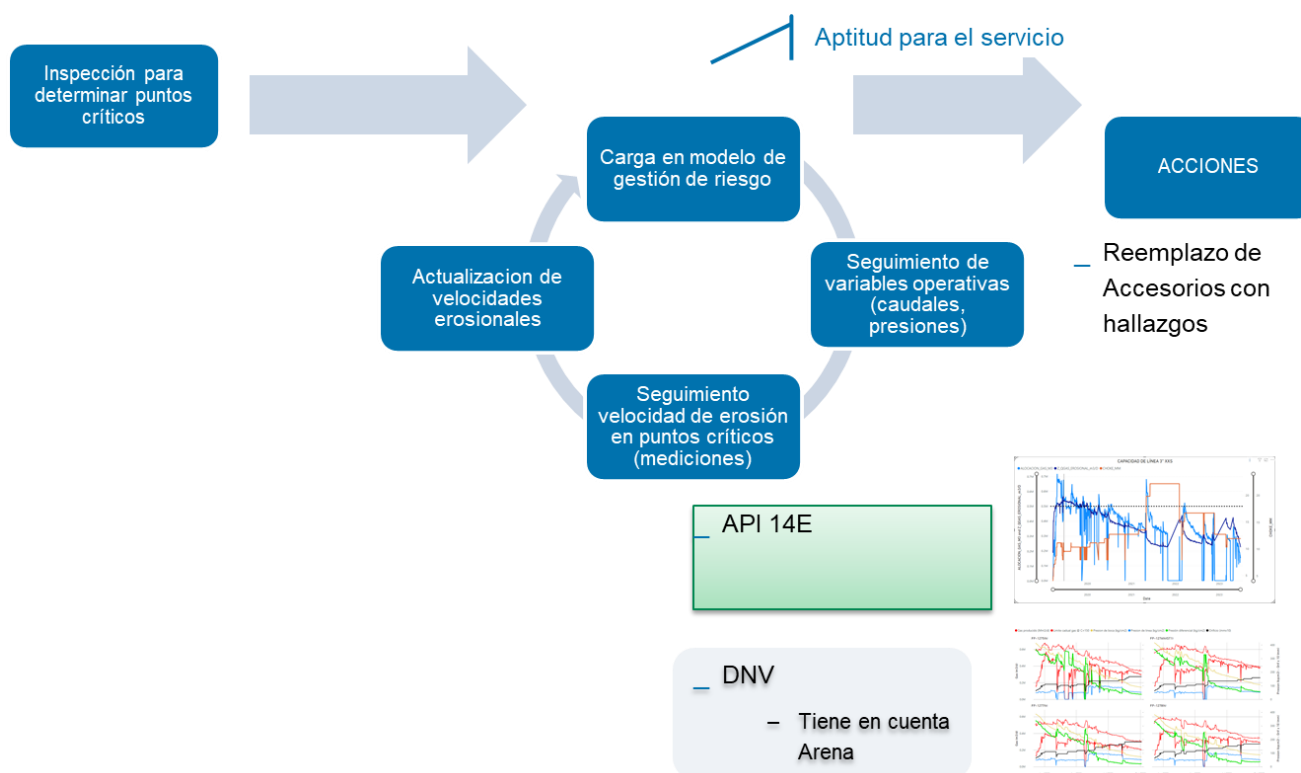


Ilustración 18 - Diagrama de Gestión del Plan de integridad PAD

El programa de inspección como se mencionó al comienzo se había realizado con base teórica de mecanismos de daño posibles y velocidades teóricas de daño, acorde al estudio de riesgo original, el mismo dio como resultado un plan de inspección base o fase cero, que fue el primer programa que se ejecutó en el inicio de servicio de las instalaciones, ahí las técnicas empleadas para estudiar eran las tradicionales de medición de espesores con UTT o UTS en determinadas zonas.

Con el análisis del caso de la falla se implementó el plan fase 1, evaluando a los pozos con técnica de inspección adecuadas para el mecanismo de daño encontrado. Eso se traduce a que por pozo existen más de 10 codos de impacto, 3 cubos de choque, 1 tee de *by pass*, y cañerías rectas a evaluar, para dar un total de 14 elementos por pozo, si a ello le sumamos, que por PAD son 3 pozos en promedio, tenemos que considerar un total de 42 elementos a examinar por PAD. Con la decisión de utilizar las técnicas de ensayo más avanzadas para cada elemento. Así se implementó inspección por *arreglo de fase* para los cubos de choques, *UTS scan* para la líneas y tramos rectos y gammagrafía digital para los accesorios con cambios de dirección.

Con los resultados del plan de inspección de fase 1 más lo que simultáneamente se iba estudiando en cuanto a velocidades erosionales y simulaciones con elementos finitos, surge el segundo programa de inspección (o fase 2), o de 3ra generación, donde se cambió las prioridades de inspección a lo que se denominó **elementos críticos**. Estos son, la tee de *by-pass*, codo de ingreso a calentador y bridas y reducción aguas abajo del CPO salida de *by-pass*. Por lo que la cantidad de elementos por pozo paso de 14 a 4 elementos, y de 42 elementos por PAD a 12 elementos. Esto se traduce en una optimización en el programa de inspección del 70% menos de elementos a evaluar. Esto permitió realizar hallazgos en pozo en forma prematura acorde al cronograma de preinspección planteado al inicio del programa.

De los continuos estudios y evaluaciones en el sistema de PAD, se pudo desarrollar e implementar un nuevo monitoreo para el mecanismo de daño de erosión, así con las ecuaciones teóricas de DNV o Salama con los factores de corrección postulados para nuestro sistema, pueden anticipar e identificar si el mecanismo de daño se encuentra presente y activo en cada pozo. De este modo surge el Plan de Inspección fase 3 o de 4ta generación. Es así que, para los pozos nuevos, ya se ejecutan planes base (de 3ra y 4ta generación) desde la puesta en marcha del pozo, teniendo en cuenta las variables operativas y posibles condiciones que cambien.

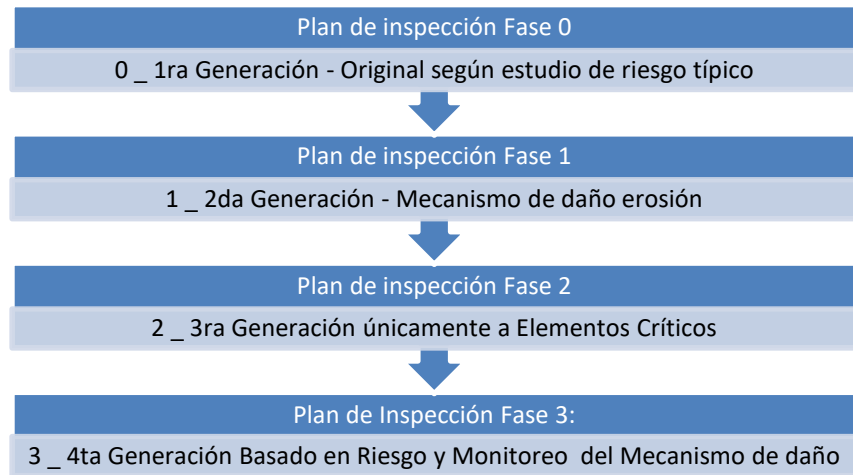


Ilustración 19 – Resumen de evolución de los programas de inspección

3.4.1. Mapa de aplicación de técnicas para Planes de inspección de 2da y 3ra generación

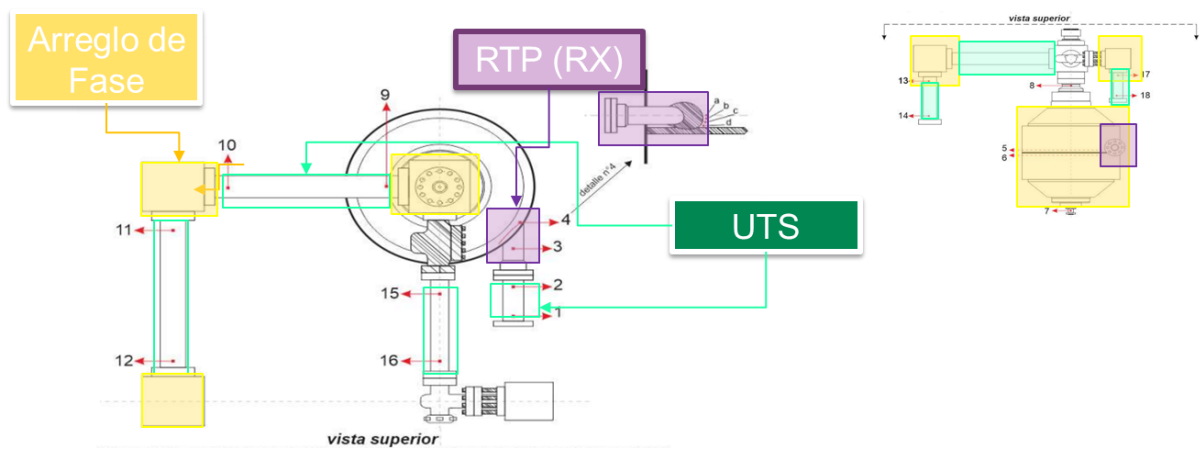


Ilustración 20 - Mapa de técnicas de aplicación para conjunto desarenador

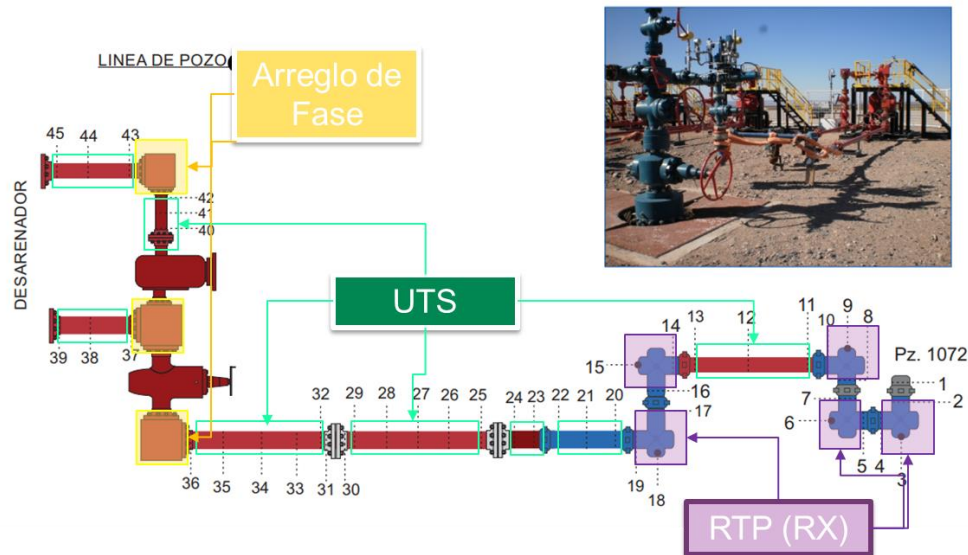


Ilustración 21 – Mapa de técnicas de aplicación para líneas de PAD

3.4.2. Retroalimentando la gestión del riesgo (RBI)

La información recibida desde las inspecciones es analizada y cargada nuevamente al software de riesgo, para su análisis y evaluación del riesgo, cálculo de la aptitud para el servicio, y próxima fecha de inspección.

Como se muestra un ejemplo en la ilustración 22, con la velocidad de erosión que tenía cargada originalmente, el histórico y proyección de riesgo queda como muestra la imagen. Se ve que el riesgo da un salto en la inspección, pero el cálculo que hace el programa considera que el espesor remanente es suficiente para la presión con que está operando la tee, por lo cual se mantiene un nivel de riesgo medio.

Si se cambia la velocidad de erosión teniendo en cuenta lo observado, esta proyección cambia. Usamos un valor de 5,35 mm/año, que sería un promedio de la velocidad desde la unificación de los 3 pozos hasta la medición, y la proyección es la ilustración 23, dónde el riesgo evoluciona a medio-alto.

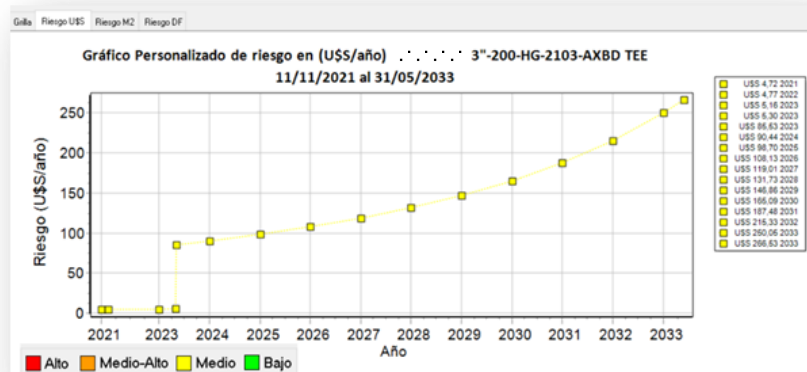


Ilustración 22 – Evolución del riesgo en tee by-pass con velocidad teórica – riesgo inicial

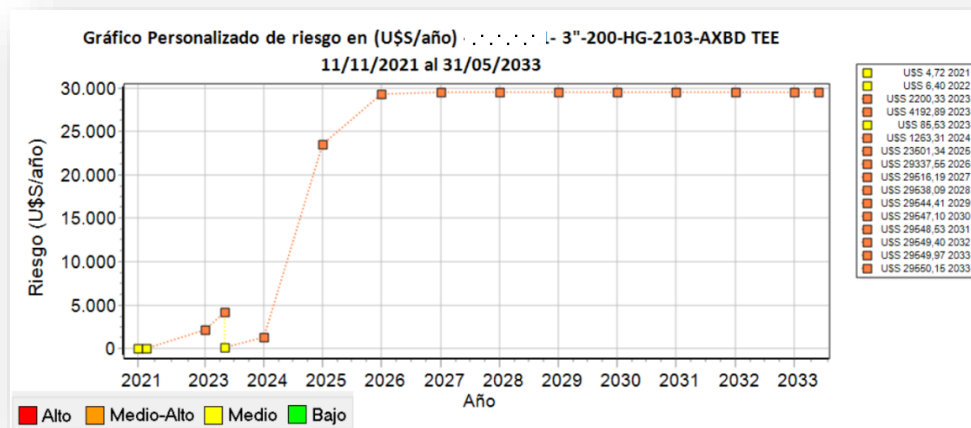


Ilustración 23 – Evaluación del riesgo en tee by-pass con velocidad de erosión medida

Así retro alimentando al sistema, obtenemos la matriz de riesgo del sistema PAD, basado en los elementos críticos: Riesgo + Próxima fecha de inspección.

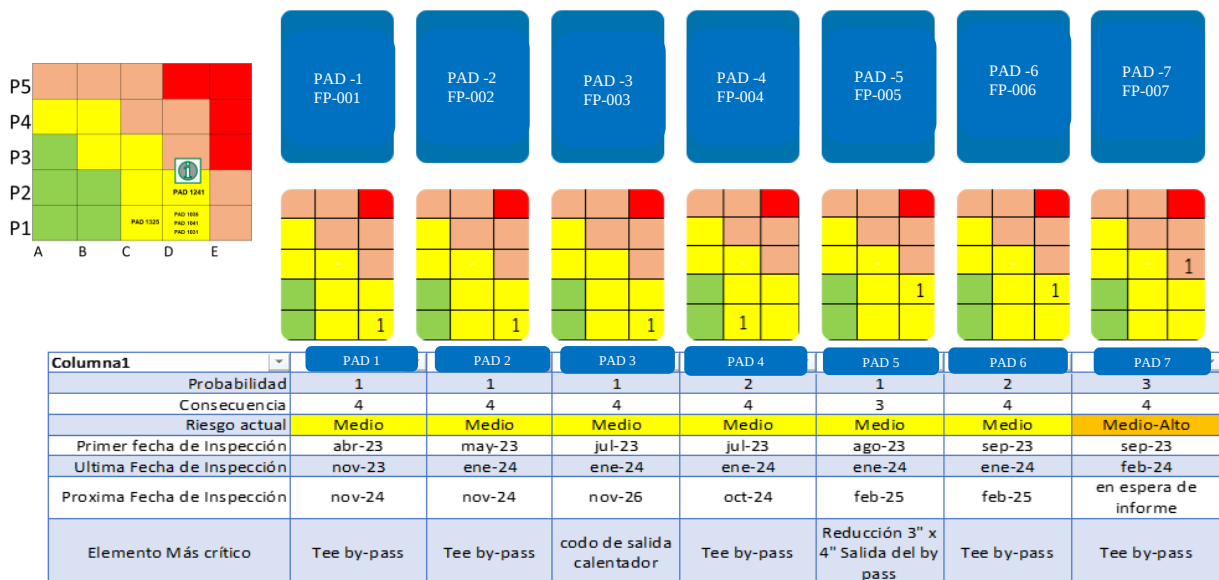


Ilustración 24 _ Matriz de Riesgo actualizada y cronograma de inspección en elementos críticos

3.4.3. Estudios de 4ta Generación - Monitoreo del Mecanismo de daño

La termografía es una técnica de imagen que utiliza la detección y medición de la radiación infrarroja emitida por un objeto para generar una imagen térmica. Esta técnica permite visualizar y medir la temperatura de los objetos y superficies sin contacto físico. Termografía significa “escribir con calor”, al igual que fotografía significa “escribir con Luz”. La imagen que se genera se denomina termograma o imagen térmica. El rango del Infrarrojo es lo que hace posible que la técnica no requiera contacto. Las cámaras termográficas ven el calor irradiado por todos los objetos. Así el empleo de los conceptos como la emisividad o la capacitancia térmica son los fundamentos teóricos para el uso de esta técnica para ser empleada como método de inspección de monitoreo del mecanismo de daño de erosión. Todo lo que existe (por encima del cero absoluto) irradia cierta cantidad de energía térmica. Así la termografía se trata de interpretar las diferencias relativas de temperatura aparente en una imagen térmica en un sistema de estudio.

Usando el concepto de Caudal Másico y Transferencia De Calor: Efecto, Relación, podemos responder y validar la técnica para ser empleada como una técnica efectiva de reconocimiento, del mecanismo de daño de

erosión. El marco teórico de la técnica empleada es que el caudal másico o el caudal volumétrico tienen relación directa con la transferencia de calor. En la transferencia de calor por convección, el caudal másico tiene una influencia fundamental. La transferencia de calor por convección mejora elevando el caudal másico o el caudal volumétrico del sistema. El caudal másico es función de la densidad, la velocidad y el área de la sección transversal por la que pasa el fluido.

Es así como planteando las fórmulas tenemos:

Flujo másico: $\dot{M} = \rho * Q = \rho * v * A = J * A$

Flujo de calor: $\Delta Q = M * cp * \Delta T$

Por lo tanto $\Delta Q = \rho * v * A * cp * \Delta T$

Así el Flujo másico es directamente proporcional al Flujo de calor

M: flujo másico (kgr/s)

Q = flujo volumétrico (m3/s)

ρ : densidad (kgr/m3)

A: área de la sección transversal (m2)

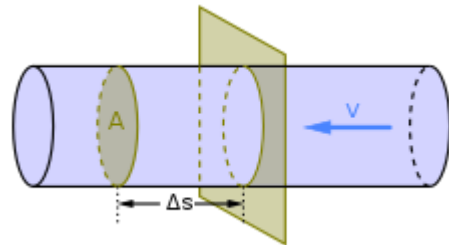
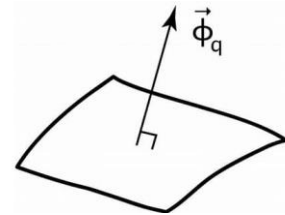
v: velocidad de flujo másico (m/s)

J: flujo másico de área (kgr/m2 s)

cp: capacidad calorífica (KCal/(C kgr)

ΔQ : flujo calórico (KW)

ΔT : diferencial temperatura (c)



3.4.4.Caso de éxito

Se probó la técnica en aquellos pozos cuyas variables operativas, verificaban la posibilidad de existencia del mecanismo de erosión. Realizando el estudio, se pudo verificar la ocurrencia del mecanismo de daño y la validación con los exámenes de gammagrafía de los elementos críticos examinados.

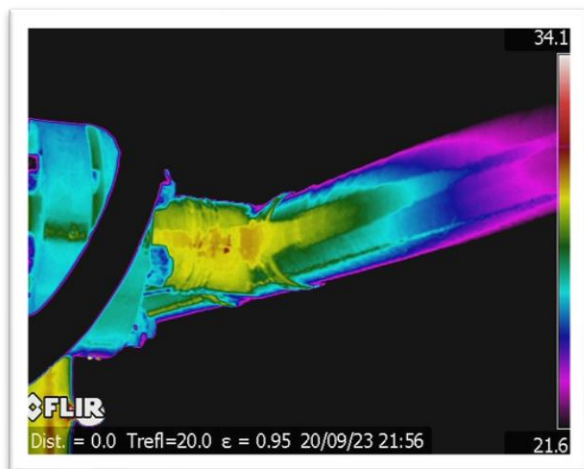


Ilustración 25 Tee en operación vista lateral

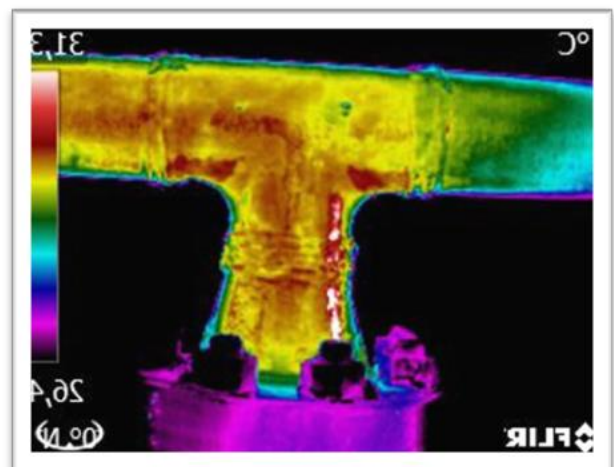


Ilustración 26 Tee by pass en operación vista en planta

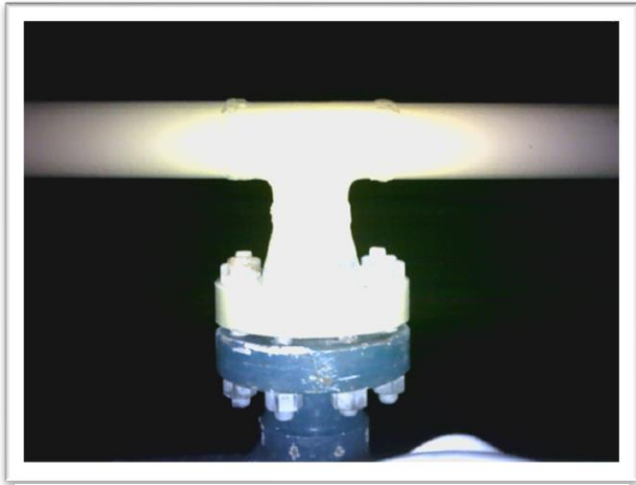


Ilustración 27 – tee fluyendo a calentador

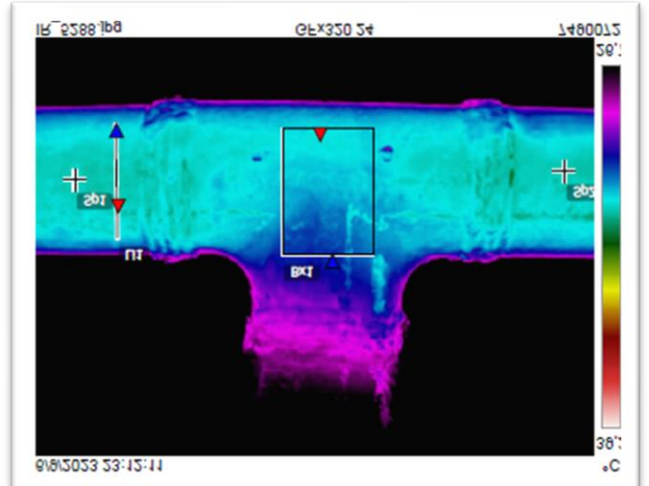


Ilustración 28 – tee sin paso en dirección a calentador

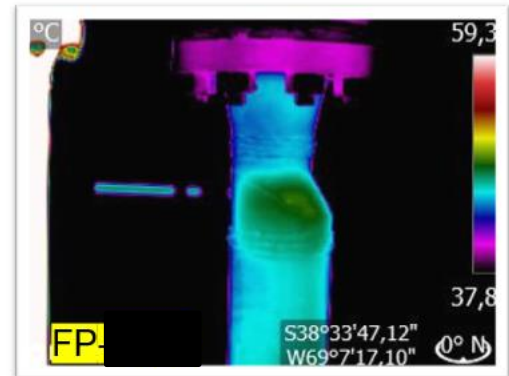
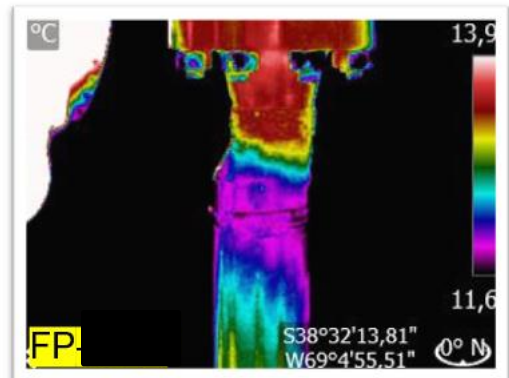
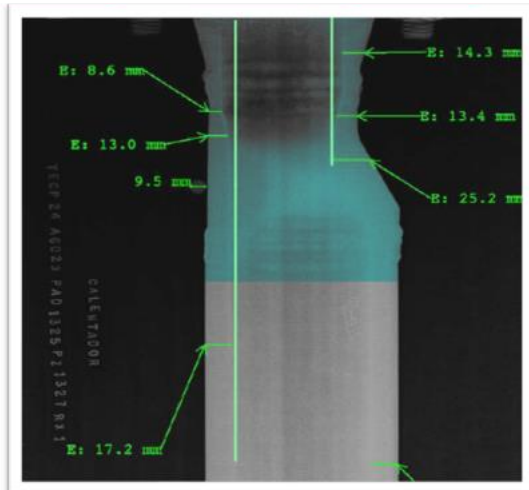


Ilustración 29 – Reducción 3x4” salida de CPO a Salida de gas

4. Conclusiones

- Se puede asegurar que el proceso de Gestión de Integridad implementado, para el sistema de producción de los pozos (PAD) mediante un modelo cuantitativo, es una herramienta práctica para la toma de decisiones sobre los elementos a inspeccionar en el sistema.
- Se puede evaluar, identificar las amenazas principales y definir las acciones de los distintos planes implementados, plan de inspección en todas las fases, monitoreo y mitigación basadas en riesgo, identificar cambios en los mecanismos de daño, incorporarlos y realizar la reevaluaciones y actualización del plan de integridad, cumple con el objetivo de planificar, inspeccionar anticipándose a las posibles fallas en el sistema.
- Se observa el mecanismo de daño, desgaste de material por alto flujo, alta diferencial de presión, que genera canalización, principalmente en la salida de los accesorios Codo de alto impacto.
- Se confirma mecanismos de daño en Tee derivación a by-pass de calentador. Se observa, reducción de sección interna, desde línea de 3" a Tee 3". Podría ser la probable causa del desgaste en la Tee dañada.
- Se confirma que la técnica de gammagrafía digital es una técnica que puede confirmar el estado de integridad en las líneas de PAD, sobre todo en las zonas más expuestas al daño de alta presión diferencial, en codos de alto impacto y accesorios Tee.
- Se confirma daño entre orificio y CPO con erosión aguas debajo de la tee. La rotura de este elemento favorece el mecanismo de daño en la Tee (debido al aumento en la velocidad del fluido).
- La simulación con modelos de elementos finitos verifica el mecanismo de daño propuesto. Uso para evaluar instalaciones nuevas o cambios operativos en la evolución de las condiciones de producción.
- Se puede realizar y utilizar el seguimiento de parámetros operativos desde sala de control (Ciencia de datos), para el control y alerta de desvíos y posibilidad de ver cambios "rápidos" en el sistema
- Uso de ecuaciones como *DNV*, *Salama* en lugar de la API 14E para evaluación de condiciones de los pozos y cálculo de la velocidad erosional.
- Realimentación del sistema de gestión de integridad y por la tanto el software de cálculo de riesgo. Determinar nuevas frecuencias de inspección, y ventanas de servicio, a elementos específicos del sistema.
- Mediante los caudales y condiciones de operación, se estimaron las velocidades de erosión por los modelos de Salama y DNV para un codo de impacto. Los valores resultantes son 3 y 6 veces menores que la velocidad medida en la tee del bypass, respectivamente.
- Se establecieron factores de corrección geométricos para predecir las velocidades de erosión a partir de los modelos erosivos en un codo de impacto.
- Se evaluó que, dependiendo de la constante "C" que se utilice, mediante el modelo de API 14E el caudal actual puede o no ser aceptable. Al contrastar esto con las pérdidas severas observadas mediante las radiografías de perfil, esto muestra la limitación en la aplicación de este criterio para definir las condiciones operativas.
- Mediante el modelado de flujo, se halló una correspondencia entre las zonas con altas velocidades y aquellas con mayores pérdidas medidas. Se observó también que los valores locales de velocidades en estas zonas son muy elevados en las condiciones en que opera el accesorio.
- Se concluye que las velocidades de erosión presentes en la tee y la erosión incipiente del codo de impacto se debe a una combinación de los siguientes factores:
 - Elevado caudal de operación (producción de los 3 pozos)
 - Baja presión de operación, lo que se traduce en una mayor velocidad de la fase gas
 - Contenido de arena presente
 - Existencia de zonas puntuales con alta velocidad por las condiciones geométricas particulares de los accesorios.
- Identificar y predecir los mecanismos de daño, su ubicación, usar la técnica exacta de inspección, optimiza la orientación de recursos.
- Con la optimización de los programas de inspección (plan de 4ta generación) se pasa de un total de 120 pozos a solamente 7 pozos (a inspeccionar con nuevas frecuencias). Esto significa que el plan de re-inspección se reduce al 94%, con los elementos identificados como críticos. Con la implementación del plan de inspección de PAD críticos, se reduce en tiempo de ejecución al 94%. Por lo tanto, los

gastos de inspección cuando se orientan solamente a los elementos críticos se reducen significativamente.

- Se valida y propone para el estado del arte de las inspecciones y monitoreo, a la termografía infrarroja, como método válido para la identificación del mecanismo de daño de erosión.
- Poder identificar si el mecanismo de erosión se presenta (monitoreo de la erosión), mejora la evaluación del sistema en las primeras etapas de producción. Identificando adelantadamente, la posibilidad de alcanzar los límites operativos y realizando el plan de inspección en forma previsible, en caso de encontrar presente el mecanismo de daño en forma pronunciada.
- Queda pendiente de realizar el cálculo de teórico para la validación flujo másico vs flujo de calor, lo que daría la aproximación para el cálculo de la velocidad de erosión en el caso de existir.
- Se consolida y valida las metodologías de cálculo de probabilidad, consecuencia y riesgo, el modelo cuantitativo se basa en probadas normativas y publicaciones internacionales, principalmente API RP 581 (Inspección basada en riesgo). Dando origen al Plan de Inspección de tercera generación, que combina una nueva técnica para visualizar y validar la presencia del mecanismo de daño presente en forma instantánea.

5. Bibliografía

- INF-tcp fdp 14-23 icorr - análisis de muestras falla en pad 1035. Autor: Tissera, Marcos - Icorr S.A. y Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- 2023-05-04-end-gamma-tecp-fdp-pad1041-fp p1042 ent y sal a cal. Tecpetrol. Autor: Petromark S.A. y Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- INF-tcp fdp 10-23 icorr - análisis de erosión tee bypass calentador pad 1041. Autor: Tissera, Marcos Icorr S.A. y Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- Descripción hallazgo en reducción pad1325 rev02. Autor: Barrientos, Iván - Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- Descripción hallazgo en tee pad1041 rev00. Autor: Barrientos, Iván - Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- Gestión de arena - plan inspección PAD. Autor: Francisco Garza - Barrientos, Iván - Gerencia de Ingeniería de Producción - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- IT-2379 - comparación de erosión en choke fijo y ajustable. Rubén Costa - MMA. Año 2023
- Estudio termográfico en pad1035_pad1041_pad_1186_rev00. Autor: Dip, Andrés - Barrientos, Iván - Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- INF-tcp fdp 14-23 icorr - análisis de muestras falla en pad 1035. Autor: Tissera, Marcos Icorr S.A. y Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- Generalization of API RP 14E for erosive service in multiphase production b.s. mclaury, spe, and s.a. shirazi, spe the erosion/corrosion research center, department of mechanical engineering, the university of tula.
- Termografía de nivel I, infrared training center <http://www.infraredtraining.com>.
- Estudio termográfico cómo método de inspección y detección del mecanismo de daño erosivo. Autor: Dip, Andrés - Barrientos, Iván - Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2024
- Filosofía y estrategia de la gestión de riesgo en integridad. Autor: Barrientos, Iván - Gerencia de mantenimiento - ingeniería de integridad – Tecpetrol – año 2023
- Risk-based Inspection API RECOMMENDED PRACTICE 580.
- Risk-based Inspection Technology API RECOMMENDED PRACTICE 581
- API Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems. API RP 14E.

6. CV de los Autores

Iván Barrientos – Tecpetrol S.A.

Ingeniero Químico, egresado de la Universidad Nacional del Comahue, especializado en el área de materiales funcionales, Facultad de Materiales de la Universidad de Saarlandes (Saarbrücken - Alemania). Trabajó como investigador Unidad-TEMADI en el Centro Atómico Bariloche: en trabajos de investigación en el Grupo de Desarrollo de Tecnologías. Como asistente de Investigación en Tecnologías Avanzadas y Materiales para Ingenieros Químicos. También en la Universidad Nacional del Comahue como integrante del Grupo de Fisicoquímica en docencia e Investigación, en la Facultad de Ingeniería. Se desarrolló como ingeniero de planta, ingeniero de proceso, Gerente de Planta y Operaciones de planta. Cuenta con más de 20 años de experiencia en procesos de endulzado, compresión, tratamiento y acondicionamiento de gas y Turbo expansión, y tratamiento de petróleo, transporte y despacho, en Medanito S.A. y con más de 12 años de experiencia como Ingeniero de Integridad Experto, como responsable de Integridad de Ductos y equipos estáticos, implementando Inspección Basada en Riesgo API580, API581, diseñando Planes de integridad de ductos y de equipos, estableciendo la filosofía de integridad. En la actualidad dentro de la Gerencia de Ingeniería de Confiabilidad e Integridad en Tecpetrol S.A, para la toda la Región de la Cuenca Neuquina y Vaca Muerta.

Marcelo Cañaveras– Tecpetrol S.A.

Ingeniero Industrial, egresado de la Universidad Tecmilenio, México. Cuenta con más de 20 años de experiencia en procesos de compresión, tratamiento y acondicionamiento de gas y Turbo expansión, transporte y distribución de hidrocarburos, cuenta además con especializaciones en válvulas y control de corrosión. Experiencia como Ingeniero de Integridad Experto, como responsable de Integridad de Ductos y equipos estáticos en México y Argentina, implementando Inspección Basada en Riesgo API580, API581, diseñando Planes de integridad de ductos y de equipos, participó además en la puesta en marcha de Gasoducto Camisea (Perú) y sistema de transporte de Gas (Chile). En la actualidad desempeñándose como Gerente de Integridad e Ingeniería de Confiabilidad en Tecpetrol S.A, para la toda la Región de la Cuenca Neuquina y Vaca Muerta.

Sebastián Chevalier – Tecpetrol S.A.

Ingeniero Electromecánico, egresado de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Se desarrolló en la industria petrolera pasando por los sectores de terminaciones/workover, pulling, producción, servicio a pozo e ingeniería de producción, actualmente Gerente Sr de ingeniería de producción en Tecpetrol Región Cuenca Neuquina y Vaca Muerta. Cuenta con más de 20 años de experiencia en la industria, trabajando en yacimientos convencionales maduros en argentina (en terminación/WO, producción e ing de prod), yacimientos Tight gas & oil en México y yacimientos Shale gas & oil en Argentina, específicamente en el proyecto Fortin de Piedra desde el origen. Principalmente abocado los temas referentes al “aseguramiento de flujo (flow assurance)”.