

HERRAMIENTA DE INSPECCION INTERNA DE GASODUCTOS

Jorge Esteban Guerrina (jorge.guerrina@ypftecnologia.com)

Diego Palmerio (diego.palmerio@ypftecnologia.com)

Misión Midstream de Y-TEC (YPF Tecnología S.A.)

1. Sinopsis

En general, los ductos de transporte están expuestos a una amplia gama de potenciales mecanismos de daño, que pueden resultar en fugas o en roturas con consecuencias sociales y económicas, si no se identifican a tiempo para prevenirlos.

No existe aún, una tecnología de inspección única que puede detectar y dimensionar todas las combinaciones de mecanismos de daños, pero podemos concentrarnos en aquella que tiene la capacidad de detectar las anomalías más frecuentes.

La tecnología MFL puede solucionar este planteo con la ventaja de tener un desarrollo de casi 30 años y con mucha experiencia favorable en la industria local. Pero no existe en Argentina un desarrollo propio para grandes gasoductos. Esto conlleva a posibles incumplimiento de las regulaciones jurisdiccionales y de los compromisos de gestión de integridad de cada operador.

Esta situación se resuelve con el diseño de una herramienta propia, adecuada a las necesidades de los ductos de Argentina, tanto para operadoras locales como para transportistas de gas y petróleo.

Y-TEC lidera el proyecto que presentaremos en este documento, cuyo objetivo es realizar el desarrollo, diseño, ingeniería y construcción de un prototipo que alcance los estándares comerciales de una herramientas de inspección interna de gasoductos de 24" de diámetro con la tecnología MFL (Magnetic Flux Leakage) o en su traducción, Perdida de Flujo Magnético.

El análisis profundo del fenómeno físico electromagnético, el estudio de distintas alternativas de diseño, la evaluación de la disponibilidad local de tecnología; materiales; instrumentación y hardware consideradas para este primer prototipo abre el camino para escalar esta tecnología en desarrollo para otros prototipos destinados a ductos de distintos diámetros y materiales, y para lograr los arreglos técnicos óptimos en cada caso. El objetivo próximo es lograr una herramienta competitiva, pero además contar con bancos de pruebas que permitan el escalado de este primer desarrollo, incluso probar otras técnicas de inspección ILI distintas al MFL. La última etapa del proyecto consiste en aplicar los conceptos y teoría del machine learning e IA para desarrollar un software de gestión de integridad adecuado a la cultura y técnicas locales para que el ingeniero/a de integridad / corrosión optimice sus recursos al momento de administrar su sistema de gestión de integridad.

2. Introducción

En general los ductos de transporte están expuestos a una amplia gama de potenciales mecanismos de daño que, eventualmente, pueden resultar en fugas o peor, en roturas catastróficas con consecuencias sociales y económicas si no se identifican a tiempo para prevenirlos o desactivarlos. Si bien las amenazas individuales pueden comprometer la seguridad operativa de un determinado oleoducto y/o gasoducto, las amenazas combinadas plantean un mayor riesgo para la integridad general del activo.

No existe una tecnología de inspección única que puede detectar y dimensionar todas las combinaciones de características que puede estar presente en su canalización. De esta manera podríamos preguntarnos ¿Podemos estar seguro de detectar de manera confiable y evaluar cada tipo de anomalía?

Por esto, diseñar una herramienta que incorpore técnicas de inspección en línea de acuerdo a las necesidades de la industria), será de vital importancia por su aporte al éxito de la gestión de integridad, de la reducción de costos de mantenimiento y reparaciones, como así para cumplir con los requerimientos legales particulares de cada sitio donde YPF y otros usuarios tienen ductos de transporte, y sobre todo para evitar elevadas sanciones económicas y penales ante posibles fallas.

El marco regulatorio y normativo local, hace obligatorio el cumplimiento de inspecciones ILI (In Line Inspection) o su traducción, Inspecciones Internas en Línea, en frecuencias periódicas que hacen que las herramientas sean un recurso importante y necesario.

Pensando en el escalado del producto final, en el mercado Argentino de usuarios o clientes de inspecciones internas de ductos de transporte tenemos empresas cuyo volumen de requerimientos de estas herramientas superan a las necesidades de YPF.

Se puede ver en la imagen siguiente, el detalle general de ductos, de los cuales un gran porcentaje tienen la obligación de ser inspeccionados con estas herramientas. Son como dice 'el argot' de la industria, "Ductos Pigeables", también derivado de la denominación "Smart Pig" que suele usarse para denominar a estas herramientas. La siguiente imagen corresponde a una publicación del IAPG – Instituto Argentino del Petróleo y Gas.



Figura 1 Mapa de ductos en Argentina . Fuente IAPG

3. Desarrollo

Al iniciar nuestro proyecto de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación), tuvimos que analizar la ***probabilidad de éxito técnico***. Podemos resumir algunos conceptos que se tuvieron en cuenta para una correcta visualización del problema y de las posibilidades de resolución.

Actualmente, la industria ofrece una variedad de tecnologías de inspección que se pueden fusionar en una herramienta para evaluar exhaustivamente varios tipos de amenazas en una ejecución de ILI, reduciendo en última instancia esfuerzos relacionados con la inspección. Pero a un costo muy alto porque los servicios además ser monopolizados por pocos proveedores, están sensiblemente acotados en número y no logran cumplir en tiempo y forma con la demanda, con consecuencias que van de incumplimiento legales regionales a falencias en las gestiones de integridad y mantenimiento de los ductos que pueden concluir en riesgos de fallas.

Cada una de estas tecnologías que ya han sido comprobadas como efectivas, tanto por la práctica como por la normativa y los entes calificadores, tienen un rango de aplicación y performance. Sin embargo, la combinación de múltiples tecnologías proporciona un valor añadido significativo ya que la evaluación combinada de varios conjuntos de datos conduce a una gestión de integridad más precisa y confiable, reduciendo el riesgo operacional.

Partiendo de esta premisa, se pueden evaluar y centrar esfuerzos en las técnicas más sensibles al requerimiento de los operadores de ductos y analizar las tecnologías actuales y combinarlas para que cumplan con objetivos a la medida de las necesidades de cada cliente final.

Tenemos a disposición un servicio para el desarrollo de la Ingeniería, en todas sus fases (conceptual, básica y de detalle), como así en la construcción de los prototipos iniciales. Además nuestros socios tecnológicos tienen experiencia en desarrollos tecnológicos de alta complejidad, cuyos casos de éxitos son reconocidos en muchos países.

Contamos también con la experiencia y recursos para simular con herramientas de última generación, el fenómeno electromagnético que será la base del diseño. Como se podrá ver más adelante en este documento, será la base teórica que sustente la técnica de detección aplicada en este desarrollo. Se pretende entonces alcanzar la sensibilidad para detectar las principales fallas de los materiales comerciales usados en los sistemas de transporte, tanto en YPF como en el resto del mercado local.

Y-TEC cuenta con el soporte técnico y la experiencia en las gestiones de integridad, tanto la específicamente desarrollada por YPF, como las utilizadas en la Industria en general, además de contar con el soporte para desarrollar y/o supervisar uno de los puntos más importante del proyecto, el software y los algoritmos de detección de anomalías, el formato de interpretación (por ejemplo basado en “machine learning”) para que los usuarios finales tengan una lectura amigable y rápida para tomar las medidas de contención objetivas y reales antes los desvíos encontrados por la herramienta de inspección.

Otro importante análisis de visualización fue la evaluación del atractivo, el valor y el impacto de desarrollar con éxito una solución.

En cuanto al ***valor y el impacto económico***, se ha realizado un dimensionamiento del mercado global y sobre las necesidades internas que permite la visualización del modelo de negocios en el que una nueva herramienta de detección de fallas en línea, de diseño propio, puede intervenir aportando al sector un importante valor no solo económico, también hace un gran aporte estratégico.

En cuanto al Alineamiento Estratégico del desarrollo, podemos decir que la centralización de todos los datos obtenidos en las inspecciones ILI las cuales pueden asociarse a los mecanismos

de daños encontrados en los distintos sitios y negocios donde operan YPF y otros operadores puede ser un punto más que positivo. Esta información puede vincularse con otros proyectos, como el Consorcio de Corrosión de Y-TEC, para obtener una retroalimentación o servir como base de datos a nuevos proyectos, por ejemplo, aquellos que actualmente se están llevando a cabo en Y-TEC como los I+D sobre el control de la corrosión MIC o posibles nuevos desarrollos vinculados con el transporte de Hidrógeno verde en ductos existentes, clave para la reducción de la huella de carbono.

Cual fue la **Solución tecnológica visualizada**? Una de las técnicas más utilizadas para la inspección en línea con “herramientas inteligentes” son las referidas al MFL. Para esta definición, se analizaron todos los mecanismos de daños más frecuentes en la red de gasoductos locales, como así el método más requerido por los operadores locales.

Pero retomando nuestra idea sobre la técnica más utilizada, que es la técnica MFL, debemos pensar en los siguientes aspectos de esta técnica:

Si conectamos los polos de un imán con un material ferromagnético, es decir que sea susceptible de ser atravesado por las líneas de fuerza que conformar el campo magnético, se distribuirán en el material entre ambos polos en forma uniforme siempre y cuando no exista una discontinuidad en el mismo; de existir alguna discontinuidad, esta perturbará la distribución de las líneas de fuerza y se manifestará tal como se muestra en la figura:

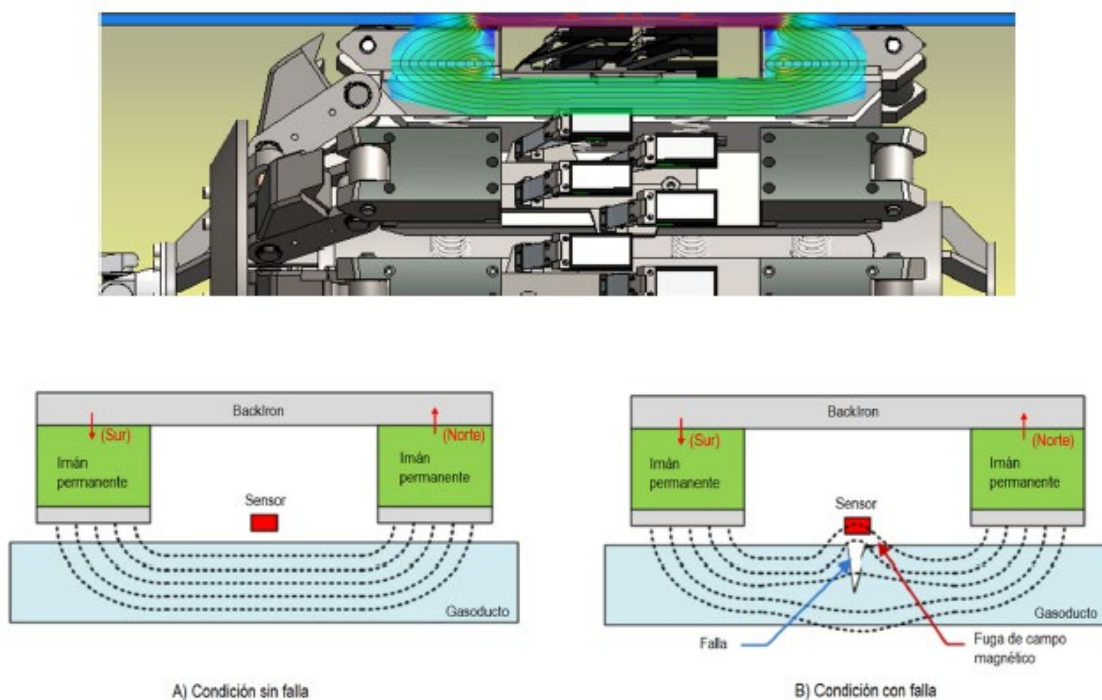


Figura 2 Principio MFL

- Flujo magnético de alta densidad en forma paralela al eje del caño, se distribuirá uniformemente de no existir discontinuidad que la perturbe.
- El Flujo se perturba si;
 - ✓ Hay una pérdida de material en la pared del caño
 - ✓ Hay material ferroso en la cercanía de la pared del caño
 - ✓ Cambian las propiedades del material.

- Si entre dichos imanes, colocamos un sensor que pueda detectar y medir esta dispersión del campo, se podrá determinar y dimensionar la discontinuidad que lo provoco mediante la interpretación de la misma.

Este es el principio conocido como “Pérdida de flujo magnético”, conocido en inglés como “magnetic flux leakage”, más conocidos por sus siglas “MFL”, con la cual se identifican a la herramientas de inspección interna que funcionan bajo este principio.

En general estas herramientas, poseen un par de cepillos circulares imantados, entre los cuales se posicionan los sensores primarios distribuidos tambien en forma circular para determinar la dispersión del campo.

En algunas de las herramientas, en su parte trasera, se montan los sensores secundarios distribuidos en forma circular. Estos sensores miden pequeñas dispersiones de campo magnético cuya función es la determinar si el defecto es externo o interno. La capacidad de detección de estos sensores es hasta el 50% del espesor del caño; es decir que si no detecta dispersión, el defecto es externo y en caso contrario es interno.

En la parte trasera se montan ruedas odométricas, en general 2, con el fin de registrar la ubicación de los distintos “hallazgos” encontrados durante la inspección, con referencia a la trampa de lanzamiento. Otro elemento importante son las ruedas centradoras, cuyo nombre describe su función.



Figura 3 MFL 36” con by pass variable y modulo geométrico (herramienta tipo combo) de la Empresa BJS

La limitación principal de las herramientas MFL está en el detección de los pits pequeños (pinholes). Se consideran defectos tipo pinholes aquellos pittings de largo y ancho de 10x10mm.

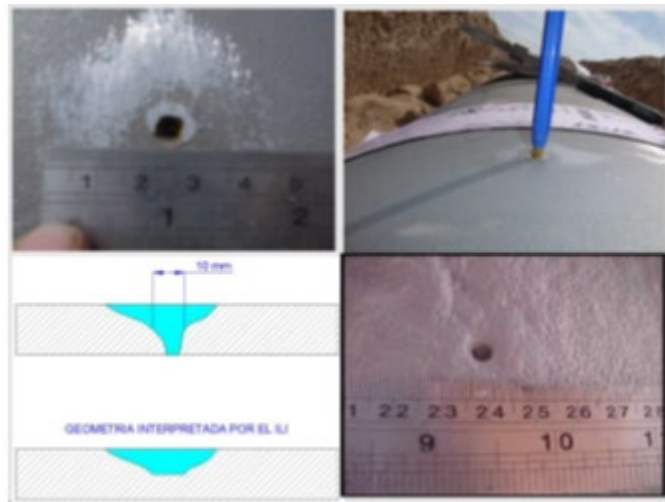


Figura 4 Limitaciones geométricas

Cabe mencionar que la razón de la selección de la técnica MFL para este primer desarrollo, fue que la corrosión generalizada en ductos, es el mecanismo de daño con mayor porcentaje de afectación tiene en la red local de “ductos pigleables” y que por ende genera el mayor uso de este tipo de tecnologías.

Otra limitación de las herramientas MFL, es la detección de defectos orientados según el eje de la cañería. Esto se da, debido a que las líneas de campo no “cortan” al defecto y el campo no se altera lo suficiente para ser detectado.

Un ejemplo de ellos lo podemos ver colocando un palo en un arroyo; si el palo lo colocamos transversal al flujo, se genera una gran turbulencia y podremos detectarla fácilmente; mientras que si esta paralelo al flujo, la turbulencia será casi imperceptible.

Si asimilamos el flujo de agua con las líneas de fuerza y el palo con el defecto, cuando el defecto este alineado con el eje de la cañería, una herramienta MFL no lo detectará ya que las líneas de campo también estarán alineadas con la cañería.

Para la detección de este tipo de defectos se ha construido una variante del MFL tradicional, denominado TFI, sigla que en inglés significa “Transversal Fiel Inspection “

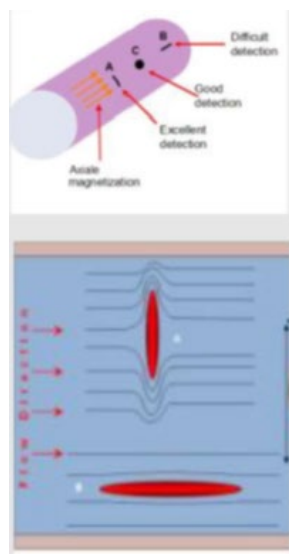


Figura 5 Tipo de campos de Flujo Magnético

Las herramientas tipo TFI, tienen los grupos de imanes girados a 90° respecto de la herramienta MFL descrita anteriormente, lo cual genera las líneas de campo magnético orientadas circunferencialmente (es decir que las líneas de fuerza están orientadas perpendicular al eje del caño. Como se describió estas herramientas están destinadas a la detección de defectos en las soldaduras, fisuras y colonias de SCC aunque para la detección y dimensionamiento de estos últimos resultaría más apropiada una herramienta con la técnica de ultrasonido, pero la cual aún no se ha podido adaptar completamente para gasoductos (líneas de gas).

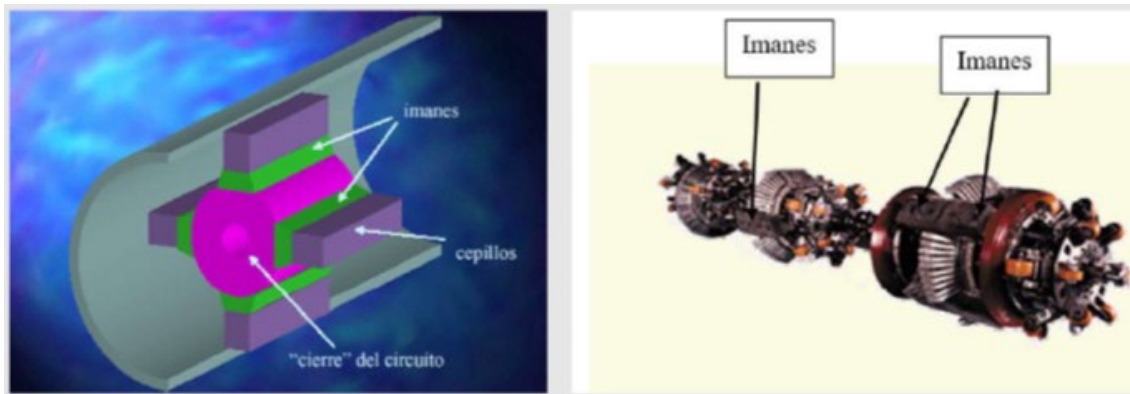


Figura 6 Herramientas TFI

Modelos utilizados para validación de la factibilidad del proyecto

El análisis profundo del fenómeno físico, el estudio de distintas alternativas de diseño, la evaluación de la disponibilidad local de tecnología, materiales, instrumentación y hardware consideradas para este primer prototipo, abre el camino para escalar esta tecnología en desarrollo para otros prototipos destinados a ductos de distintos diámetros y materiales y para lograr los arreglos técnicos óptimos en cada caso.

El primer paso, como se indicó previamente, fue la validación tanto de la posibilidad de contar en Argentina con todos los recursos para lograr el objetivo de resolver el diseño y construcción de una herramienta MFL de forma local, se validó también el recurso de softwares suficientemente potentes para obtener modelos FEM electromagnéticos y que pudieran simular las fallas que las herramientas MFL comerciales encuentran en las inspecciones ILI. Se comprobó que era posible definir los campos y las mallas para fallas típicas, y se realizaron y comprobaron los modelos paramétricos del conjunto del flujo axial y longitudinal, y de los sensores con la sensibilidad para detectar las variaciones de flujo.

La técnica de MFL generalmente se aplica en componentes manufacturados con materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad magnética. Los imanes que configuran la herramienta saturan magnéticamente la pared del tubo y luego, un conjunto de sensores del tipo efecto Hall posicionados en un arreglo circunferencial, detectan la fuga de flujo magnético. Por ejemplo una pérdida de espesor detectado por los sensores es enviado como una señal electrónica a un equipo de adquisición de datos que se encuentra en el PIG para ser almacenado y post-procesado. Luego, con los datos registrados, se realiza un tratamiento de las señales y se ubican los defectos y sus dimensiones.

El modelado matemático resulta casi indispensable en la etapa de diseño de un equipo basado en la técnica MFL, como así también para una mejor interpretación y efectiva utilización de esta

técnica durante el normal funcionamiento del “Smart PIG”. Existen dos metodologías generalmente utilizadas para predecir señales de MFL provenientes de defectos:

- métodos analíticos;
- métodos numéricos;

En los métodos numéricos, la pérdida de flujo se obtiene a partir de la solución de las ecuaciones de Maxwell con condiciones de borde apropiadas. Los métodos numéricos son capaces de resolver problemas no lineales complicados con geometrías completamente generales. Como contrapartida, se tiene un tiempo de cómputo que para algunos casos puede resultar relativamente alto. En cambio, en los métodos analíticos, los defectos se asumen como dipolos en las paredes del defecto facilitando el cálculo para la obtención de las componentes del campo magnético. Es un método rápido, pero solamente aplicables a problemas lineales.

Si bien se usan ambos métodos y se comparan resultado, se logró una solución, mediante el uso de un Modelo de Elementos Finitos (MEF) tridimensional para simular la fuga de flujo magnético por defectos en tuberías y analizando la precisión del modelo propuesto a través de comparaciones con resultados de bibliografía y la experiencia. El software empleado para la simulación es el software Oofelie [1] desarrollado en colaboración entre la Universidad de Lieja y la Universidad Nacional del Litoral, y comercializado por la Firma Open Engineering, en su módulo de electromagnetismo.

Con respecto al modelo paramétrico, se realizaron las comprobaciones y análisis de distintas variantes geométricas para configuraciones posibles de diseño de la herramienta, las variaciones de flujo a distintos ángulos de los campos respecto de los sensores y la posibilidad de la diferenciar la ubicación externa o interna del defecto.

Con respecto al modelo analítico, se pretende realizar una comparación entre el campo magnético de fuga calculado por medio de una solución analítica con la solución obtenida en forma numérica a través del método de los Elementos Finitos (MEF).

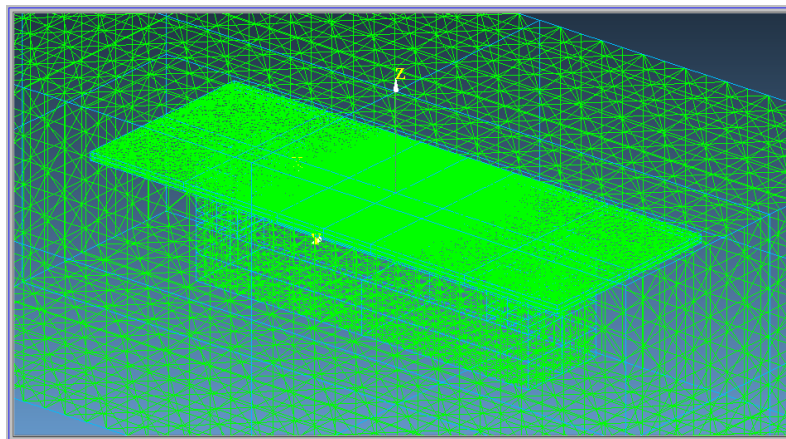


Figura 7 Malla de elementos finitos utilizada.

Se presenta entonces una solución analítica para el campo magnético de fuga en función de la fuerza del campo magnético aplicado, dimensiones de la grieta y permeabilidad del acero.

Particularmente, se analizaron soluciones para defectos finitos de distintas geometrías obtenidas con una distribución uniforme de cargas positivas y negativas, donde las ecuaciones finales se calculan por integración del campo magnético en un punto. Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con las soluciones del MEF mediante un análisis lineal y otro del tipo no lineal.

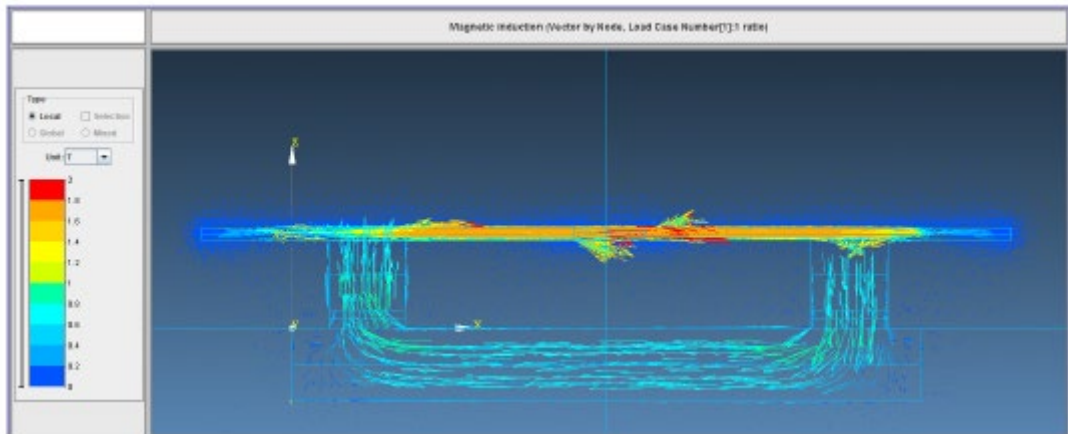


Figura 8 Modelo 3D utilizado para estudio de perdida de flujo mediante el MEF.

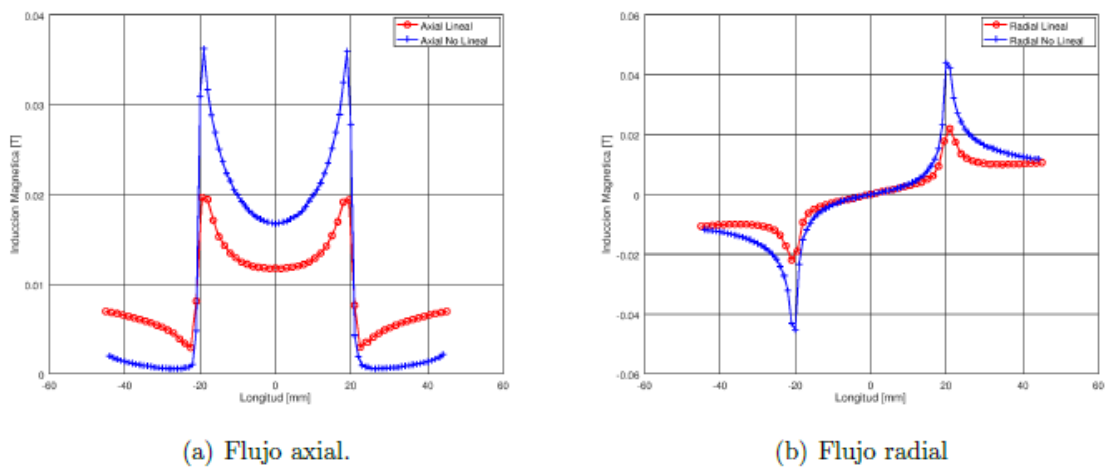


Figura 9 comparación del flujo axial y radial con un análisis lineal y otro no lineal.

[1] A. Cardona, I. Klapka, and M. Geradin. Design of a new finite element programming environment. Engineering Computations, 11:365-381, 1994.

Diseño y desarrollo de la ingeniería

Antes de explayarnos en los detalles de diseño, dejamos un resumen del proyecto:

- **El desarrollo de HIIG cuenta con 3 módulos operativos:**
 - *Módulo de detección de fallas por fuga de flujo magnético (MFL)*
 - *Módulo de Detección de Abolladuras*
 - *Módulo de Navegación*
- **Submódulos auxiliares**
- **METs Modelos de evaluación tecnológica**

Como se indicó anteriormente, en el estudio se definió que estos módulos serán los requeridos por los usuarios y operadores de Gasoductos.

Al momento de la presentación de este documento, se completaron las siguientes etapas:

- Ingeniería de requerimientos e ingeniería conceptual de los módulos
- Ingeniería de modelos de evaluación tecnológica (METs). Adelantamos la mención de esta tarea, que será explicada en los próximos párrafos
- Ingeniería básica de los módulos

Específicamente se desarrollaron

- Los documentos guías de la ingeniería y sobre los conceptos de operación, procedimientos,
- Los requerimientos tanto generales como específicos de cada uno de los módulos de la herramienta (guía de los documentos de la ingeniería en las distintas fases).
- Se desarrollaron todas las Descripciones, Diseños Básicos y Arquitectura IT de los 3 módulos, cada submódulos y módulos accesorios del HIIG.
- Se realizaron listados con las mejores preselecciones de componentes, accesorios, submódulos, incluidas sus posibilidades de arreglos técnicos y sus combinaciones óptimas mediante la aplicación de matrices de decisión adecuadas y de fácil seguimiento (mediante la evaluación de la disponibilidad de tecnología y materiales, instrumentación y tipos de arquitecturas del hardware);
- Este diseño requiere contemplar muchas especialidades distintas, con diversos tipos de documentos de respaldo y seguimiento (hardware, software, firmware, arquitectura, electrónica y mecánica que aplica a cada módulo y submódulo). ***Se aplica un método específico de I+D y gestión de Ingeniería***



Figura 10 Configuración general de la herramienta

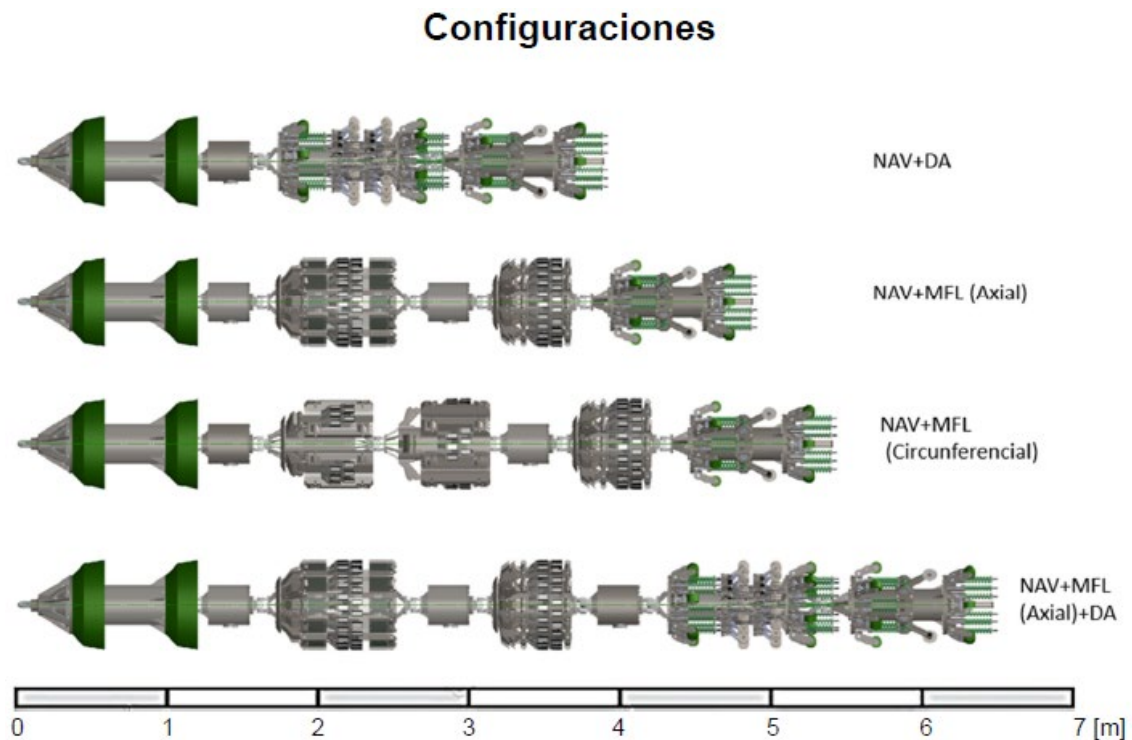


Figura 11 Distintas posibilidades de configuración de los módulos de la herramientas

El primer detalle de la ingeniería al que nos avocaremos será sobre aquellas relacionadas con las tecnologías MFL

- Configuraciones del módulo MFL
- Submódulo MFL Axial (MFL-A)
- Submódulo MFL Circunferencial (MFL-C)

Módulo de detección de fallas por fuga de flujo magnético (MFL)

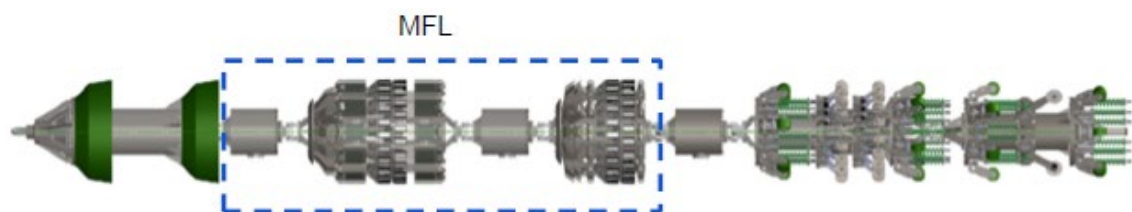


Figura 12 Configuración del módulo MFL

En ambos casos son configuraciones de sensores triaxiales y con la capacidad mínima de detectar fallas de 10 mm x 10 mm x 10% t (t: espesor del ducto en inspección)

Cabe recordar antes de abordar el detalle técnico de cada módulo, la metodología empleada para sustentar las hipótesis de diseño y definir y seleccionar conjuntos; subconjuntos y componentes. Se utilizaron matrices de decisión combinadas con la iteración de cálculos y dimensionamientos, y posterior análisis de cada configuración adoptada como hipótesis

Entonces el criterio para LA TOMA DE DECISIONES se basó en el uso de matrices de decisión, que tienen criterios técnicos y valorativos para la óptima selección de cada elemento a ser utilizado en los distintos módulos y submódulos que integran la herramienta.

El uso de estas matrices se basa en la asociación de cada criterio, con una “Ponderación”. Se califican todas las opciones disponibles en el mercado o con las técnicas actuales de desarrollo, tomando criterios adecuados desde costos; logística; capacidad de reemplazo para mantenimiento, si es un material importado o no; su eficiencias y rangos de aplicación, etc. Entonces se califican, por ejemplo, con una escala del 0 al 10, en la cual, dependiendo de la cantidad de opciones disponibles, se puede optar por fijar un mínimo del conjunto de requerimientos para especificar una medida, de “cumple” o “no cumple”

Ilustraremos con un ejemplo

Imanes permanentes						
Criterios	Densidad de energía	Temperatura máxima de servicio	Resistencia a la corrosión	Resistencia a la desmagnetización	Costo	Puntaje obtenido
Ponderación	7	10	8	7	7	
Iman 1	8	5	5	8	3	223
Iman 2	5	8	8	5	10	284

SUB-MÓDULOS MFL AXIAL Y CIRCUFERENCIAL

El diseño de ingeniería básica de ambos submódulos estará compuesto por los siguientes componentes, conjuntos, subconjuntos:

- Bastidor: Pieza estructural destinada a ser el núcleo de vinculación de las unidades magnéticas.
- Soporte de unidad magnética: Soporte pivot que hermana al conjunto magnético con el bastidor.
- Conjunto Unidad magnética: Encargado de generar el circuito magnético axial.
- Conjunto Unidad de lectura: Porta sensores magnéticos y es solidario a una unidad magnética.
- Conjunto brazo: Vinculación del soporte de unidad magnética con la unidad magnética.

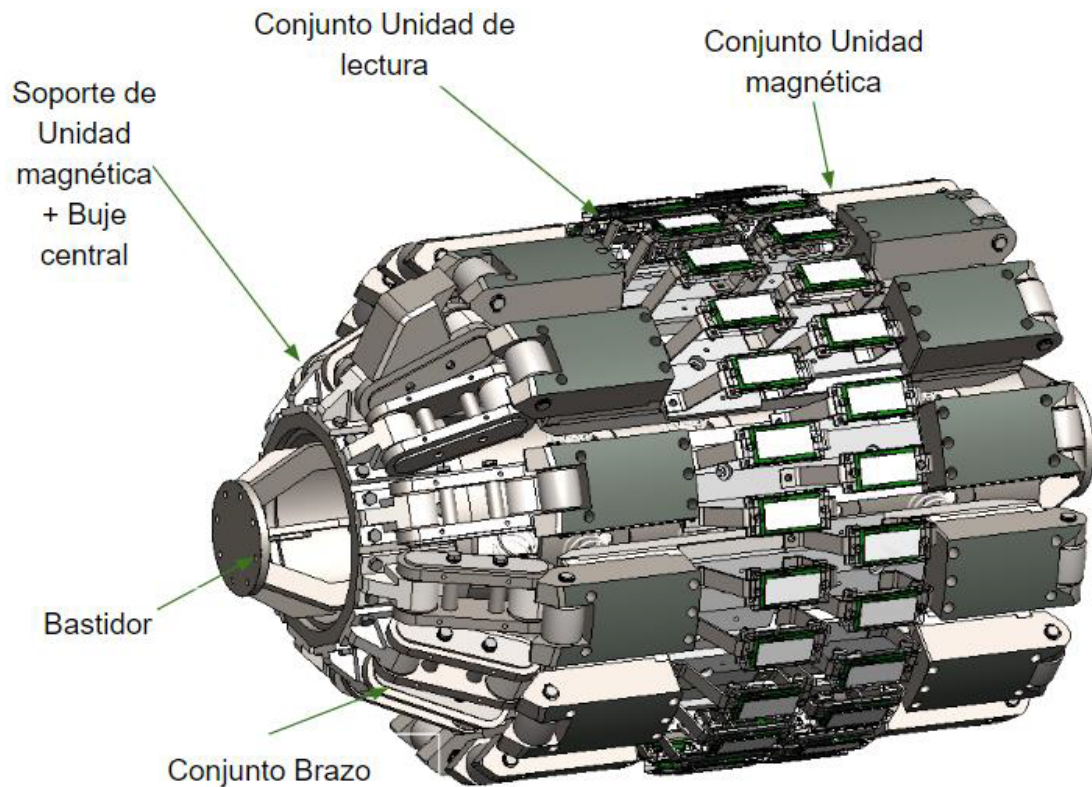


Figura 13 Submódulo MFL axial

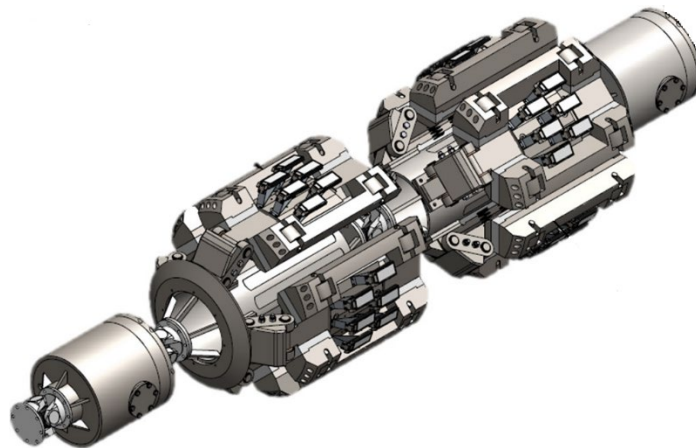


Figura 14 Submódulo MFL circunferencial

Por su parte, cada subconjunto está conformado por distintos elementos que logran el diseño:

En el caso del subconjunto Unidad Magnética de los submódulos Axial y Circunferencial estarán compuesto por (entre otros componentes):

- Patín: Pieza de contacto magnético entre la unidad magnética y el caño
- Backiron: Parte del circuito magnético de baja reluctancia magnética que, a su vez, cumple una función estructural.
- Espaciador: Pieza que protege los imanes de los impactos.

- Resortes de compresión: aseguran el contacto con la pared del caño y restitución ante despegues.
- Imanes: encargados de generar el campo magnético en el circuito magnético.
- Subconjunto rueda: mantienen el patín a la distancia definida por el diseño
- Seguros y arreglos varios, para evitar colapsos estructurales

MET MFL Axial / Circunferencial

Antes de pasar a la descripción de otro submódulo, es importante para el diseño en general, detallar un ítem muy imprescindible del proyecto, el diseño, la ingeniería y construcción de los **METs** “Modelos de Evaluación tecnológicas” y sus posibles configuraciones para ensayar cada módulo y submódulo y verificar si se alcanzan los parámetros operativos esperados.

Los METs, además están diseñados para poder escalar cada módulo y submódulo de la herramienta, para verificar a futuro otros diseños de herramientas de inspección MFL para otros diámetros, incluso varios de ellos podrán ser de utilidad para ensayar prototipos de nuevos diseños para otras técnicas de inspección distintas al MFL.

A modo de ejemplo, mostramos el diseño del modelo de evaluación tecnológica para la unidad magnética del módulo MFL Axial:

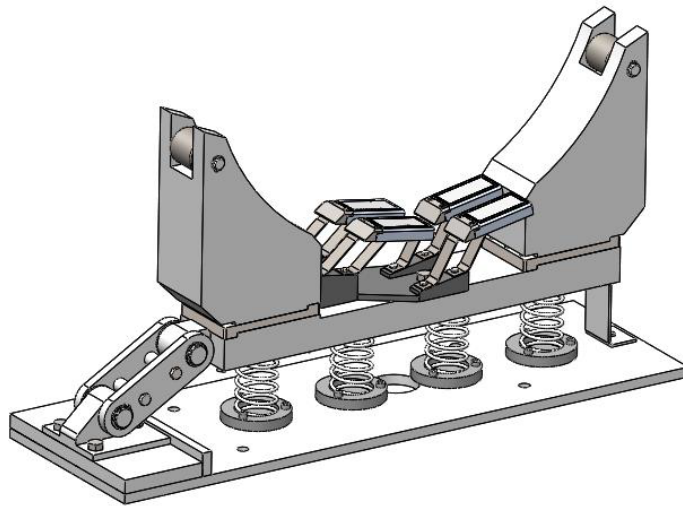


Figura 14 Ejemplo de MET

Es importante, hacer notar que los patines llevan el mismo radio de curvatura que el banco de ensayos. Éstos fueron diseñados para tener una sección equivalente a la del patín de la herramienta para no afectar el flujo magnético. Como se podrá entender, en este MET, el movimiento de rotación simulará el movimiento de la herramienta en el ducto.

Cálculos de dimensionamiento del submódulo MFL Axial /Circunferencial

Para llegar a este grado de definición en ambos Submódulos, además de los mencionados estudios realizados con los Modelo de Elementos Finitos (MEF) del campo electromagnético, se realizaron una serie de cálculos de pre-dimensionamiento de cada componente previamente detallado.

Se establecieron entonces parámetros estadísticos; resolución mínima; probabilidad de detección de fallas; parámetros de diseño (estructurales); de resistencia de materiales; de cinemática de los mecanismos (como selección de rodamientos, constantes de fricción etc.), de rangos de movimiento; entre otros. Se definieron también, relaciones matemáticas que asociaban estos

parámetros con los valores físicos, como diámetros de la tubería, cantidad de circuitos magnéticos necesarios y cálculos asociados a la definición del tipo de imanes seleccionados

Definición del rango de diámetros del módulo, y cálculos de los elementos elásticos; Se analizó la cantidad y tamaño de los circuitos magnéticos dentro del rango de diámetros de paso de la herramienta. Este análisis inicial de requerimientos estableció un margen de adaptación de los diámetros máximos y mínimos, para que los sensores mantengan el contacto con las paredes internas del ducto y puedan soportar un margen de deformaciones. Se aplicaron conceptos de colapso y se estableciendo márgenes de temperatura, presión y propiedades de los materiales.

Determinación de la cantidad de circuitos magnéticos; Estos serán ubicados de forma circunferencial en el módulo MFL Axial a partir de la cantidad de puntos de lectura establecidos como mínimos requeridos.

Cálculos para la selección de Imanes; Se establecieron niveles de magnetización necesarios por el diseño, de manera de lograr el dimensionamiento de la unidad magnética. De igual manera se realizaron los cálculos necesarios para la selección del imán del MET.

Cálculos para el diseño de los elementos rodantes y bujes; se definieron parámetros de temperatura, fricción y niveles de magnetización (para evitar problemas de atracción magnética)

Cálculos para el diseño de la unidad lectora; se establecieron cantidad de puntos de lectura (adquisición de datos) y su agrupación para determinar los circuitos electromagnéticos.

Cálculos y Análisis de materiales para encapsulado; Se definió el tipo encapsulado blando como el recubrimiento de aislación para cada uno de los arreglos (por ejemplo los sensores), para evitar los efectos del medio (como la necesidad de resistir el desgaste por el contacto prolongado contra la pared del gasoducto).

Análisis y selección del rodamiento para ruedas; Se determinaron las horas de funcionamiento, por una estimación de una cantidad de corridas por año, el recorrido máximo de cada inspección y la velocidad nominal de navegación de la herramienta.

SUB-MÓDULO MFL RESIDUAL

Para lograr discriminar e identificar si la falla detectada tanto por el módulo axial como el circunferencial, se ubica en el lado interior o exterior del ducto, se visualizó el desarrollo de 2 tecnologías de detección;

- MFL de campo residual.
- Corriente de Foucault pulsante.

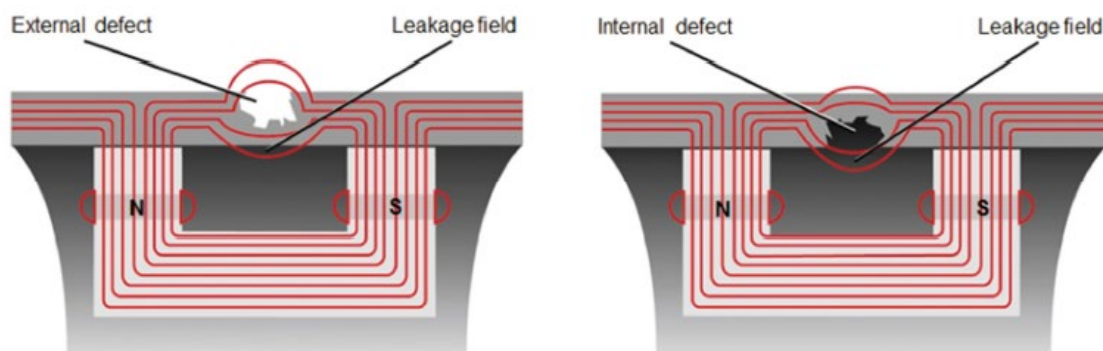


Figura 15 Discriminación de fallas internas / externas por corrientes de Foucault

Se realizaron análisis en ambos casos, se logró el avance del desarrollo de la ingeniería básica de un submódulo de MFL residual. Pero una vez en esta etapa, se logró realizar la comparación técnica con el desarrollo de la tecnología de detección por corrientes pulsantes.

La comparación resultó que el desarrollo de corrientes de Foucault tiene mayores ventajas que el módulo de MFL residual.

Por esto el desarrollo de este requerimiento para la determinación si la falla es del lado interno o externo del ducto, se decidió por la tecnología de Corriente de Foucault pulsante.

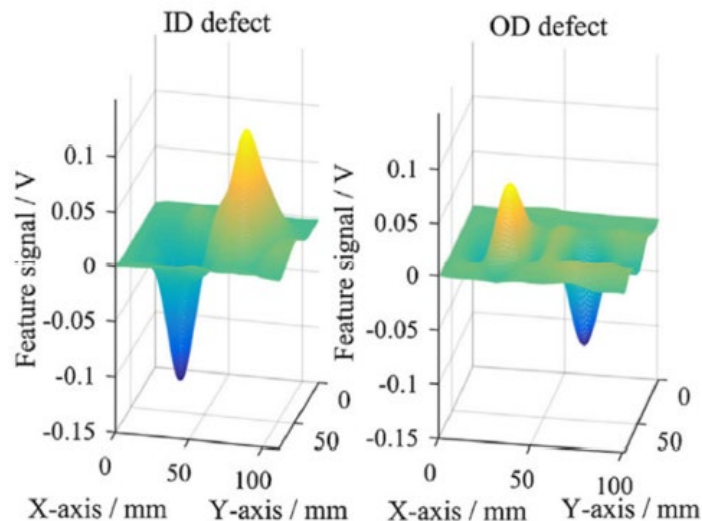


Figura 16 Discriminación de fallas internas / externas por corrientes pulsantes

MÓDULO MULTIFINGER

El “Multifinger” es un dispositivo empleado para medir el diámetro de la pared interna de una tubería utilizando múltiples palpadores. Mediante el uso de una gran cantidad de palpadores o “dedos”, el calibrador puede detectar pequeños cambios en la pared de la tubería. El objetivo principal de la medición es detectar deformaciones.

Las partes principales de este módulo son:

- Elementos de contacto “Palpadores”
- Conjunto Brazo-Sensor
- Sensores

Además, tal cual el desarrollo de los submódulos MFL, se diseñó el correspondiente banco de ensayo o MET (Modelo de Evaluación tecnológica)

- Modelo de Evaluación tecnológica (MET)

Para todas estas partes principales del multifinger, y para cada uno de sus componentes, se realizó y analizó una matriz de decisión tecnológica, comparativa entre las distintas posibilidades de productos y/o ensambles y arreglos disponibles tanto en el mercado local, como de importación.

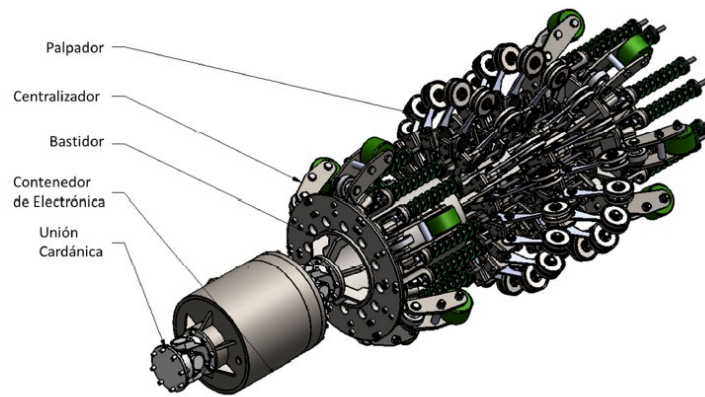


Figura 17 Módulo detector de abolladuras (Multifinger)

Para lograr el diseño final de la ingeniería básica, se definieron y validaron parámetros físicos y estadísticos, los cuales deberán cumplir ciertos rangos de servicio, y alcanzar de esta manera los requisitos mínimos de eficiencia que buscamos para la herramienta.

Entonces para los cálculos de diseño de este módulo, se establecieron los siguientes parámetros estadísticos; resolución circunferencial mínima; probabilidad de detección de fallas y parámetros de diseño (estructurales, resistencia de materiales; rangos de movimiento; cinemática de los mecanismos; entre otros). Se definieron entonces relaciones matemáticas que asociaban estos parámetros con los valores físicos, como diámetros de la tubería; espesor de los palpadores; tamaño mínimo de las fallas; distancia entre palpadores; cantidad de palpadores; etc.)

MÓDULO DE NAVEGACION

Durante la etapa del desarrollo de la ingeniería conceptual, se evaluaron distintas posibilidades de diseño para el Módulo de Navegación.

Este módulo que cumple con la tarea de contener todos los elementos necesarios para el guiado, la ubicación de las herramientas y trazado de la tubería a inspeccionar.

Para definir el Módulo de Navegación debemos detallar algunos conceptos que hacen a su diseño (incluyendo la definición de algunos de sus componentes):

Propulsión pasiva: Capacidad de que, por su geometría, la herramienta se desplace sólo por la acción del flujo de gas (medio).

Es importante detallar que se analizo en profundidad el tipo de control a implementarse en el diseño del modulo de navegacion, y definimos las posibilidades como Control Pasivo, Control Activo y Control Semi Activo, Con el control pasivo, la herramienta solo puede fijarse en una velocidad, pero que ante cualquier cambio en el caudal del gas, la velocidad cambiara con los cambios del medio. En cambio en el Control Semi Activo, la herramienta puede controlar la velocidad dentro de un rango preestablecido. Por último, el método de control definido para el diseño fue el de Control Activo, cuya principal ventaja es la adaptabilidad a variaciones en las condiciones del flujo, geometría; rugosidad del gasoducto y material lubricante depositado en pared. Estas variaciones modifican las necesidades de empuje para desplazar la herramienta y son difíciles de estimar previo al lanzamiento.

Por lo indicado definimos entonces

CAV: “Control Activo de Velocidad”, conjunto de elementos que, como su nombre lo indica, permiten la regulación de la velocidad del conjunto.

IMU: (del inglés inertial measurement unit), unidad de medición inercial, es un dispositivo electrónico que mide e informa los cambios de velocidad (aceleraciones lineales), y las rotaciones (aceleraciones angulares usando una combinación de acelerómetros y/o giróscopos).

Odómetro: es un instrumento de medición que mide la distancia recorrida por la herramienta en la unidad de longitud en la cual ha sido configurado (metros, kilómetros, millas, etc.).

La vinculación de estos 2 últimos componentes, en permanente comunicación con la unidad de adquisición de datos (hallazgos de fallas en el ducto), logra que podamos ubicar espacialmente cualquier señal debida a una alteración del flujo magnético.

Otro componente no menos importante:

Sistema de rastreo (Baliza): instrumento encargado de emitir una señal que permite determinar la ubicación del módulo dentro de la cañería.

Se propone una arquitectura para el módulo dividida en dos submódulos: submódulo de propulsión (ubicado en el frente de la herramienta) y submódulo de medición (ubicado en la cola de la herramienta). Esta disposición se adoptó debido a que el ducto central requerido para el paso de gas hacia la válvula del tipo by-pass reduce considerablemente el espacio disponible. Además, dado que el cuerpo de propulsión no requiere un centrado estricto, se pueden colocar centralizadores únicamente en el módulo de medición. Esto implica que estos centralizadores pueden centrar el submódulo de medición de mejor manera, ya que la masa involucrada es mucho menor.

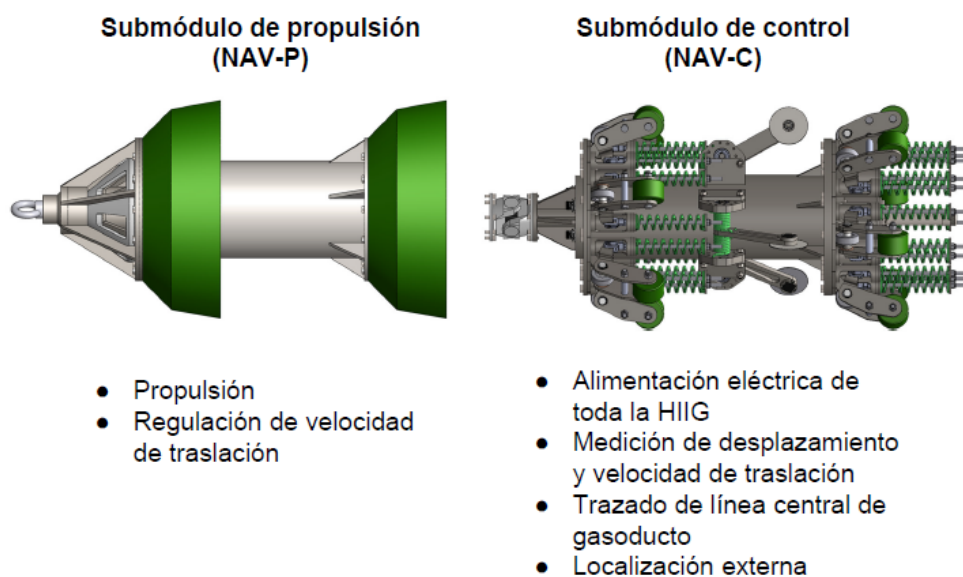


Figura 18 Módulo de Navegación – Formado por los submódulos NAV-P y NAV-C y los componentes que alberga cada uno

El submódulo de propulsión está conformado por un contenedor de electrónica que alberga los componentes electrónicos del módulo de navegación, como también las baterías y electrónica asociada para alimentación de toda la herramienta HIIG. El mismo se encuentra sellado por una tapa removible que permite realizar mantenimiento de los componentes del interior del recipiente. La forma del mismo es anular, lo cual permite el paso del gas por su centro hacia la válvula de by-pass que regula el empuje. Las únicas dos copas de toda la herramienta HIIG se encuentran en este módulo, de forma tal de concentrar el empuje del gas en el primer módulo y que los demás (ej.: módulo MFL) sean tirados por este. El uso de dos copas se debe a que cuando la herramienta pasa por una conexión en T hay una copa que no sella el gasoducto.

El submódulo de medición contiene los odómetros para la adquisición de datos de ubicación de las fallas y medición de velocidad para el controlador de la válvula de by-pass. Además, cuenta con centralizadores que mantienen el submódulo centrado respecto a la línea central del gasoducto y una IMU, contenida en un recipiente de presión, que permite trazar la trayectoria de la herramienta. Estos sensores se encuentran conectados al contenedor de electrónica en el submódulo de propulsión mediante cables que ingresan al recipiente por medio de conectores estancos. La unión entre ambos submódulos se realiza con un acople articulado que permite el paso por curvas.

MODULOS AUXILIARES

Otro punto importante del proyecto fue el diseño de los módulos auxiliares necesarios para la construcción, calibración y operación de la herramienta que se identifican en el documento.

Se establece un diseño conceptual de un dispositivo multifuncional, propuesto para transportar a la herramienta al lugar de la operación, asistir el ingreso/egreso del gasoducto (en las “Trampas de Scrappers” y, también, poder ser usada en taller para su mantenimiento.

Entonces con distintas configuraciones de las estructuras que componen el módulo auxiliar, se pueden lograr funcionalidades distintas, por ejemplo:

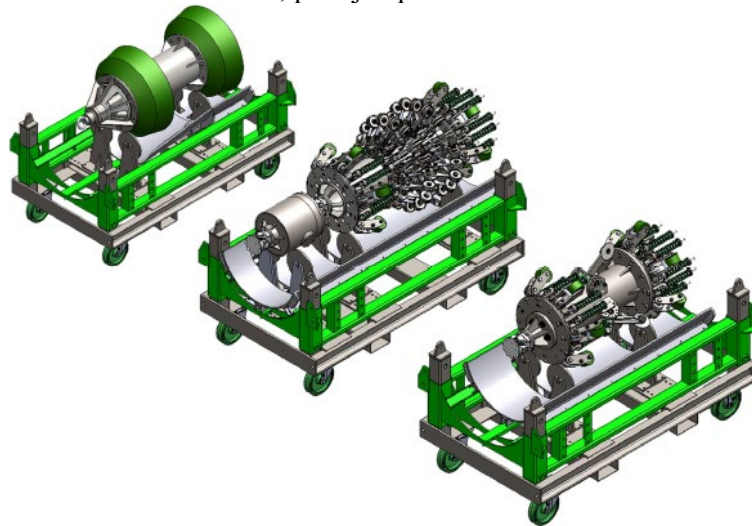


Figura 19 Módulos Auxiliares . Configuración para el trabajo en taller

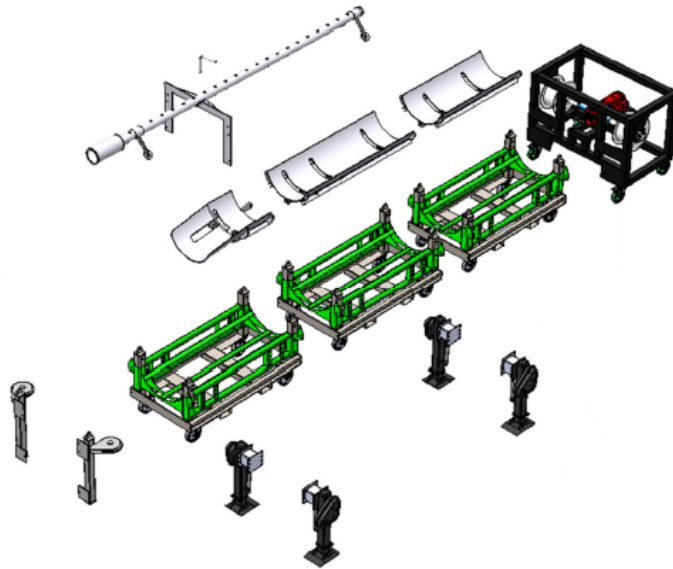


Figura 20 Módulos Auxiliares . Configuración para el lanzamiento

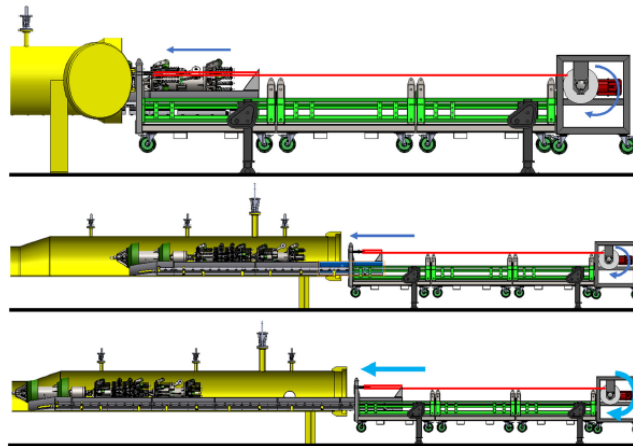


Figura 21 Módulos Auxiliares . Configuración para el lanzamiento

Los cálculos de este módulo, también fueron basados en la definición de parámetros que limitaban los rangos de las variables involucradas en las operaciones de lanzamiento, recepción, transporte y trabajo de mantenimiento en taller con la herramienta.

Se definieron entonces los procedimientos para las operaciones descritas. Se tomaron en cuenta los parámetros físicos involucrados para aplicar la matriz de decisión para lograr el diseño más eficiente por ejemplo se atendieron las siguientes características de los módulos auxiliares; peso, confiabilidad, facilidad de diseño, facilidades de operación y diseño escalable.

En cuanto a los cálculos de diseño, se basaron en el dimensionamiento del sistema hidráulico, y los cálculos de resistencia estructural y de los materiales involucrados.

METs Modelos de evaluacion tecnológica

Si bien ya nos adentramos en el concepto de MET, la importancia de esta parte al proceso de Investigación y desarrollo amerita que ampliemos el detalle;

Se desarrollaron METs, para las evaluaciones del Odómetro, IMU, los submódulos MFL Axial y Circunferencial y para el módulo Multifinger.

Estos MET que pueden estar vinculados son bancos de ensayos multipropósitos, todos con el fin de validar y ajustar las hipótesis de diseño, buscando que la herramienta tenga la eficiencia planteada como objetivo.

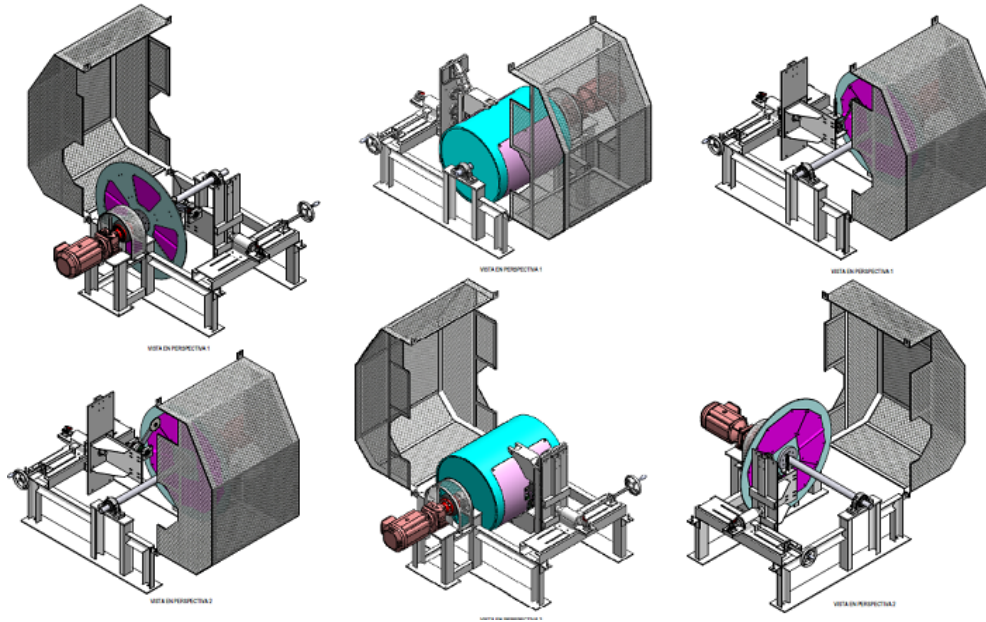


Figura 22 Detalle Bancos de pruebas

Otros ensayos de validación, que tambien son planificados y diseñados, son:

- Ensayo de condiciones ambientales para evaluar la resistencia de baterías y la electrónica, a las presiones y temperatura que será sometida la herramienta.
- Ciclados térmicos, para comprobar el funcionamiento de los subsistemas entre los cambios de temperatura
- Simulacros de lanzamiento, recepción, operación.
- Pruebas piloto en condiciones reales de operación

Desarrollos de Firmware y Software

Esta parte del desarrollo tiene 2 aspectos a cubrir;

Desarrollo de Firmware y Software de Navegación y adquisición de datos.

El desarrollo del firmware y software responden a los controles necesarios para la correcta navegación de la herramienta dentro de los parámetros de operación y servicio requeridos de los submódulos MFL Axial y Circunferencia, el Módulo Multifinger, el Módulo de Navegación y los

módulos auxiliares. También debe tenerse en cuenta las necesidades de gestión y adquisición de los datos obtenidos en la “corrida” o inspección del tramo de gasoductos realizado, es decir deben controlar el correcto almacenamiento y la descarga de los mismos.

Software para la Gestión de Integridad

El software debe diseñarse para el uso del ingeniero de integridad y/o ingeniero de corrosión, usuarios finales del servicio de inspección ILI.

El software será capaz de entregar criterios de reparación según espesores encontrados en las inspección ILI a discreción del usuario, dependiendo de variables como MAPO, frecuencias, tipos y alcances de las inspecciones, tipo y alcance de las reparaciones, según la selección de la normativa a aplicar, pudiendo ser una de ellas, o aplicar varias, y aplicar también el concepto de PGI (plan de gerenciamiento de integridad) y/o herramientas específicas como los conceptos de Fitness for Service (Aptitud para el servicio) y/o Inspección basada en Riesgo, que pueden a su vez incluir desarrollos y análisis de FEA (elementos finitos para la determinación estructurales de tensiones).

Cuando se habla de normativa a aplicar para la gestión de la integridad del ducto, también se tiene en cuenta las regulaciones locales aplicables.

4. Conclusiones

El estadio actual de desarrollo, las necesidades en franco aumento del uso de las herramientas inteligentes para las inspección ILI, resultan en la importancia de concretar las últimas fases de este proyecto, lograr la Ingeniería de detalle, la construcción y prueba de los prototipos y su escalado final.



Figura 23 Imagen de la herramienta desarrollada por simulación

5. Bibliografía y Referencias

- ASME B31G Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines
- ASME B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
- ASME B31.8 Gas Transmission and Distribution Piping System
- A. Cardona, I. Klapka, and M. Geradin. Design of a new finite element programming environment. Engineering Computations, 11:365{381, 1994.
- Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines Pipeline Operators Forum (POF)
- Integrity Management of CRA Pipelines - POF
- Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines - POF
- Guidance on Field Verification. Procedures for In-Line-Inspection - POF
- Guidance for achieving successful In-Line-Inspection – POF

6. Curriculum Vitae

Jorge Guerrina

- Ingeniero aeronáutico, UNLP (Universidad Nacional de La Plata)
- Experiencia como Ingeniero de Integridad, desempeñando este perfil en Petrobras Argentina (Cuenca Austral) y YPF en (Loma Campana - Vaca Muerta). Postgrado en Corrosión Metálica (UTN), MBA (UNCo) y certificados como Inspector API 653 (Tanques de Almacenamiento), API 510 (Recipientes a Presión) y API 580 (Inspección Basada en Riesgo). Docente en la Carrera de Ingeniería en Petróleo UNAJ
- Actualmente Tecnólogo Sr. en Y-TEC (plan de desarrollo de expertise interno) e Ingeniero de Integridad Sr.

Diego Palmerio

- Ingeniero Químico, UBA (Universidad de Buenos Aires)
- Experiencia: Desde hace 20 años trabaja en temas de I+D, liderando proyectos y equipos interdisciplinarios en temáticas de producción, acondicionamiento y transporte de Gas y Petróleo.
- Actualmente Líder de la Misión Midstream en Y-TEC