

Gemelos Digitales de Equipos de Perforación: Optimización de Planes de Inspección Basados en Riesgo

Cutini, Pablo Adrián: pcutini@pan-energy.com

Moreno, Jonathan: jmoreno3@pan-energy.com

Ortiz Inostroza, Francisco Raúl: fortiz@pan-energy.com

Gemelos Digitales de Equipos de Perforación: Optimización de Planes de Inspección Basados en Riesgo

1. Sinopsis

La optimización de planes de inspección basados en riesgo (RBI) es una estrategia clave para mejorar la seguridad, eficiencia y disponibilidad operativa de los equipos de perforación en la industria petrolera. Este estudio propone un enfoque innovador mediante el desarrollo de gemelos digitales de los equipos críticos involucrados en la perforación.

Un gemelo digital es una representación virtual dinámica que replica el comportamiento físico y operativo de un equipo en tiempo real, integrando datos históricos, operacionales y de monitoreo continuo.

A través de la implementación de estos modelos digitales, es posible simular escenarios de falla, evaluar condiciones reales de operación, y calcular con mayor precisión la probabilidad y consecuencia de fallas en función del tiempo y del contexto operativo. Esto permite una toma de decisiones más precisa en la planificación de inspecciones, focalizando recursos en los puntos de mayor criticidad y reduciendo inspecciones innecesarias.

El enfoque propuesto integra metodologías de análisis de riesgo cualitativo y cuantitativo con estos modelos digitales dinámicos. Al vincular esta información con los principios del RBI, se facilita la identificación de puntos críticos y la priorización de intervenciones de inspección.

El estudio demuestra cómo la integración de gemelos digitales en metodologías RBI permite una gestión proactiva del riesgo, mejora la confiabilidad operacional y optimiza los costos de mantenimiento, sin comprometer la seguridad ni la integridad de los activos.

2. Introducción

Este informe presenta una estrategia de optimización para los planes de inspección de los equipos de perforación tipo Rapid Rigs, utilizando la metodología de Inspección Basada en Riesgo (RBI).

A través del desarrollo de un Gemelo Digital y análisis estructural mediante software FEA (Análisis de Elementos Finitos), se identifican zonas críticas en términos de tensiones y fatiga, permitiendo la implementación de una planificación más eficiente y focalizada, con el objetivo de optimizar los recursos de inspección, priorizando componentes estructurales críticos y reduciendo la frecuencia en zonas de bajo riesgo, mejorando así la eficiencia operativa y la gestión de los planes de integridad.

La metodología utilizada, contempló el modelado estructural tipo alambre (Wire Elements) basado en datos de diseño y operación, el análisis de tensiones bajo criterio de Von Mises, la evaluación de fatiga conforme a API RP 2SIM y la aplicación de RBI mediante matriz de riesgo que combina probabilidad y consecuencia de falla.

Como resultado se obtiene la optimización de los planes de inspección donde, modificando los planes y frecuencias de hasta un 56% de elementos estructurales de dos equipos de perforación.

Con estos resultados se busca una reducción de costos operativos, una mayor eficiencia en campañas de inspección, mejorar la toma de decisiones para mantenimiento y gestión de activos, haciendo foco en componentes críticos para evitar incidentes y garantizar una operación segura.

3. Términos, abreviaturas y definiciones

- **DTM:** Disassembling Transport Mounting.
- **CAT III:** Categoría de Inspección conforme a API RP 4G
- **CAT III PLUS: Re-categorización de CAT III con inspección más exhaustiva**
- **CAT IV:** no tiene implicancia por API 4G pero se considera agregar inspecciones adicionales a lo indicado por la norma que se continua haciendo para cumplir el requerimiento.
- **Gemelo Digital:** Representación virtual y dinámica de un sistema físico. En este documento el gemelo consta de: Interfase entre una réplica de digital de un sistema 3D, en formato maqueta exportable a módulo FEA, y un sistema de datos continuo en el tiempo.
- **FEA:** Finite Element Analysis
- **Fatiga:** Fenómeno de rotura o falla en material bajo tensiones por la acción carga cíclica.
- **MOC:** Manejo del Cambio.
- **RBI:** Inspección Basada en Riesgo.
- **RIG:** Equipo perforador.
- **Tensiones:** Esfuerzo o fuerza interna a la que solicita un material al aplicarse una fuerza o momento externos sobre una superficie de dicho material.

4. Desarrollo

El desarrollo del Gemelo Digital de los RIGs es el pilar fundamental del presente estudio. Para ello se tuvieron las siguientes consideraciones y condiciones de borde:

- Cargas dinámicas de Operación.
- Cargas dinámicas DTM: Cargas sostenidas variables angularmente, calculadas por modelado FEA.
- Cargas Estáticas: Provista por fabricante y calculadas por modelado FEA, para las condiciones de verticalidad, posiciones angulares predefinidas, y posición de reposo horizontal.
- Cargas Torsionales: Desequilibrio vincular, desplazamientos milimétricos entre apoyos, para estos análisis se consideró un desplazamiento relativo entre cilindros, hasta alcanzar las tensiones de fluencia.
- Materiales – Composición y Limites de Resistencia: Los informados por el Diseño y verificados por ensayos destructivos y metalográficos.

4.1. Modelo Estructural

En la Figura 1 se observa el modelo utilizado tipo Alambre (Wire Elements), construido a partir de los datos de diseño y constructivos de los equipos alcanzados. Además, se resaltan los componentes principales de la estructura.

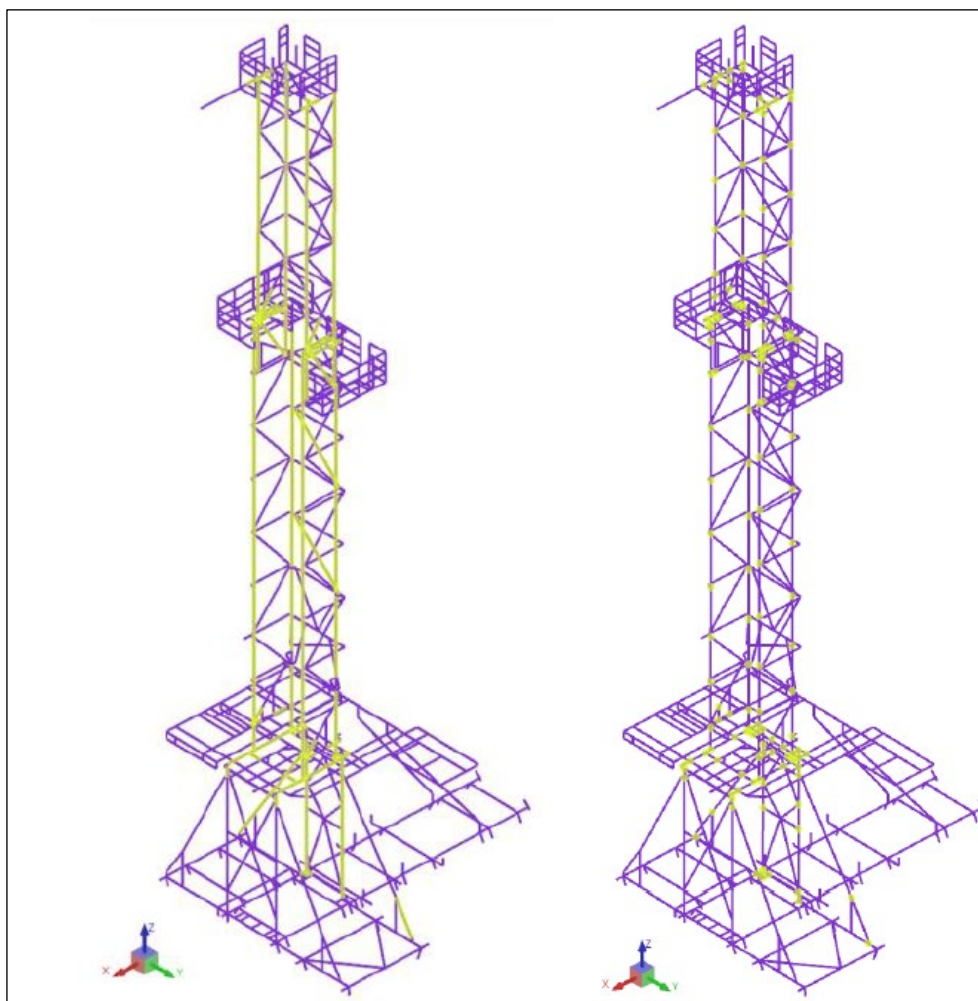


Figura 1. Modelo estructural RIGs.

A su vez, para el desarrollo de los siguientes modelos (tensiones y fatiga), el gemelo se alimenta de datos en tiempo real de la operación a través del sistema de monitoreo.

Además, se analiza la inclinación crítica para carga sostenida (peso propio), por calculo inercial de maqueta, para condición inclinada que se indica en la Figura 2.

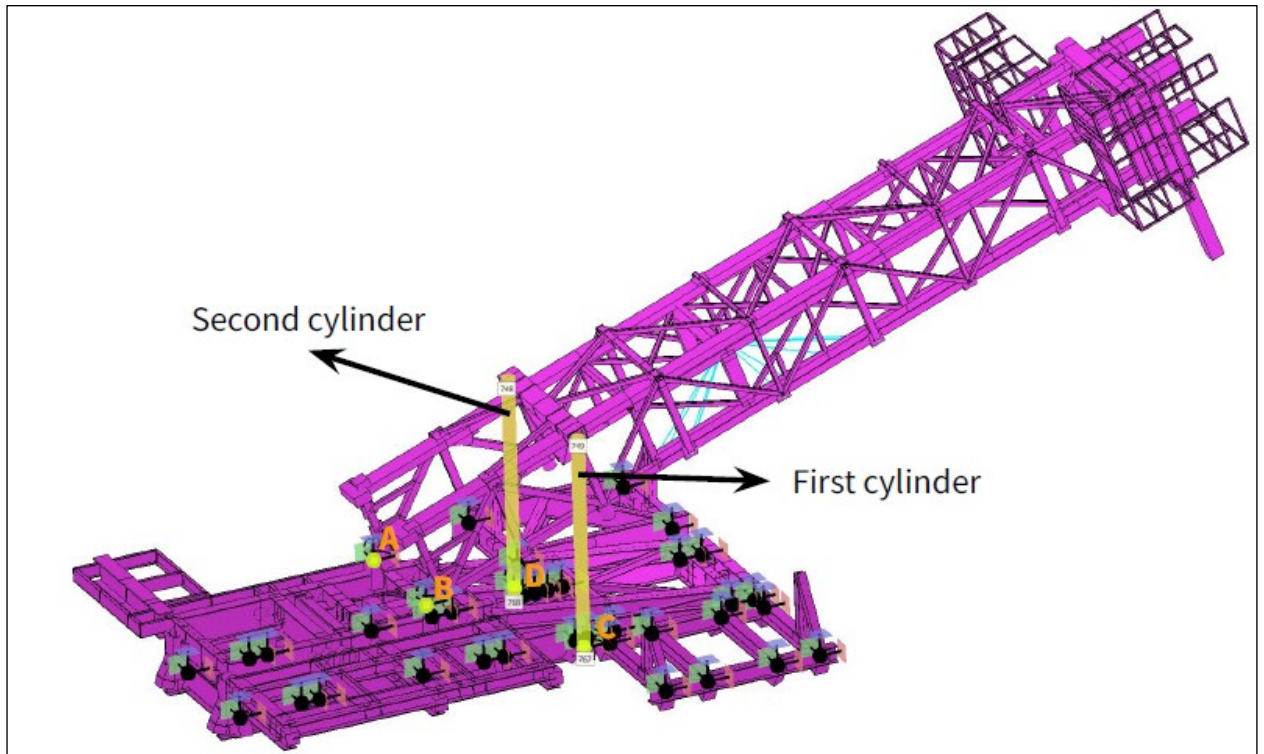


Figura 2. Inclinación de la estructura durante DTM.

4.2. Modelo de Tensiones

Se realiza un análisis de tensiones de modo alambre bajo el criterio de Von Mises, en el cual se calcularon cargas operativas y en condición de DTM.

Como resultado se obtuvieron los puntos críticos de la estructura, es decir, aquellos componentes cuyas tensiones se encuentran próximas a la tensión de fluencia del material. El modelo entrega un mapa general de las tensiones de los equipos.

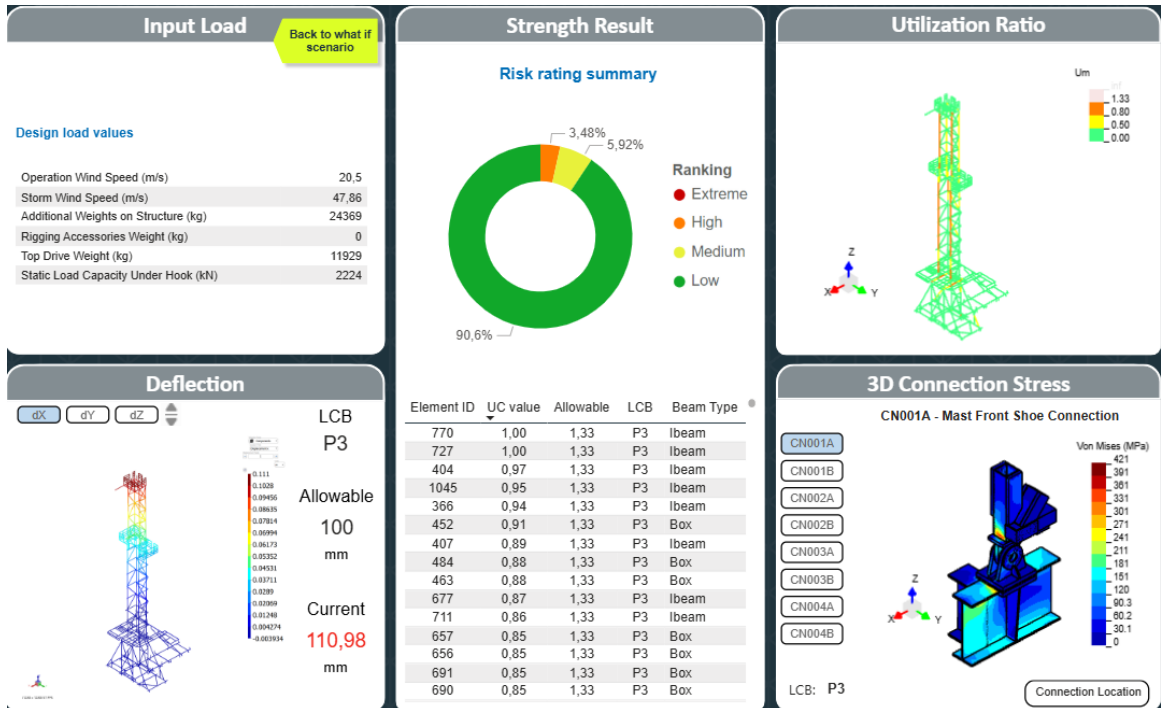


Figura 3. Análisis de tensiones de la estructura.

4.3. Modelo de Fatiga

Tomando en consideración el análisis de tensiones más los análisis de mecánica de fatiga de los materiales se determinó el riesgo de falla temprana por acción de los ciclos acumulados que determinan la vida útil, siguiendo los lineamientos de API RP 2SIM.

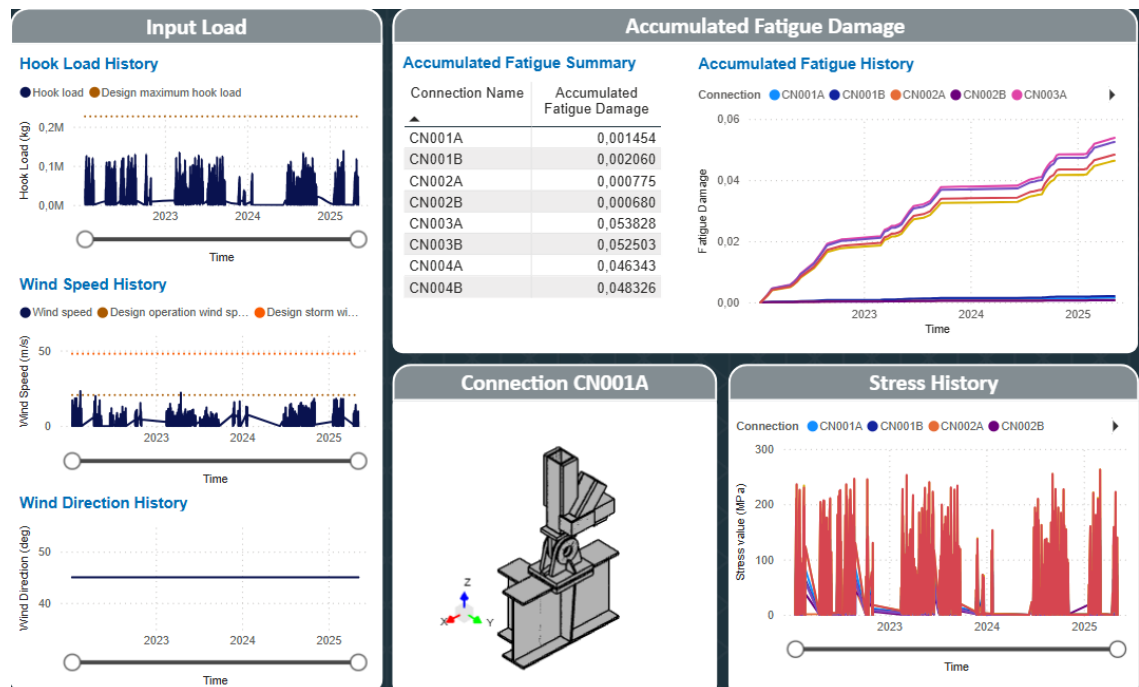


Figura 4. Análisis de fatiga de la estructura.

4.4. Modelo RBI

Al combinar el análisis estructural (tensiones y análisis de fatiga) con el análisis pushover permite identificar y jerarquizar los puntos críticos y asociarles un cronograma de inspección de acuerdo con su criticidad.

La aplicación puede ahorrar una gran cantidad de costos operativos en mano de obra y equipo, ya que el alcance de cada campaña de inspección se limita a algunas posiciones de toda la estructura.

El flujo de trabajo para la metodología RBI es el siguiente:

- 1- **Creación de modelos estructurales:** Análisis de Stress y Análisis de Fatiga. (Realizados en los apartados 4.2 y 4.3)
- 2- **Análisis Pushover:** determina la carga máxima que soporta el modelo, es decir, la carga máxima frente al colapso de la estructura ante la ausencia del elemento analizado.
- 3- **Cálculo de RIF (Redundancy Index Factor):** Se define como el factor de carga cuando ocurre el evento de colapso en el análisis pushover.
- 4- **Cálculo de CoF (Consequence of Failure):** consecuencia al colapso total ante una falla por fatiga.
- 5- **Cálculo de PoF (Probability of Failure):** probabilidad de falla por fatiga o daño estructural.
- 6- **Construcción de matriz de riesgo:** combina CoF y PoF en una matriz de 5x5 para clasificar el nivel de riesgo de cada componente.

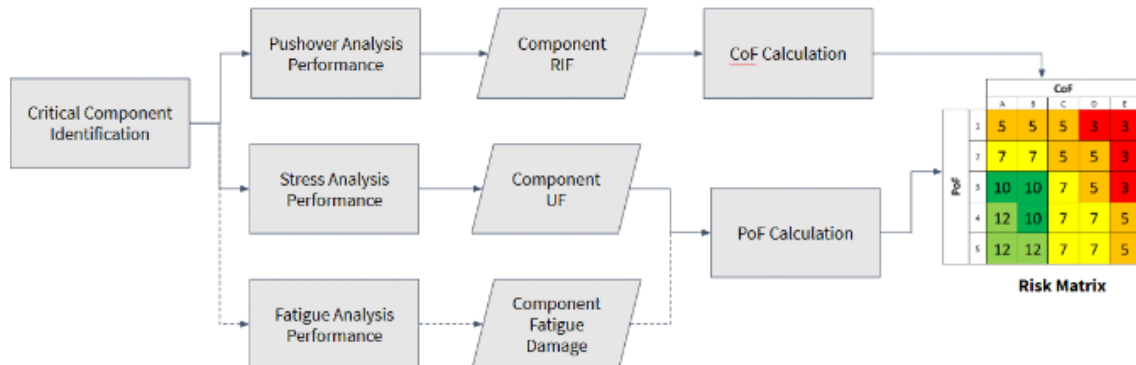


Figura 5. Esquema de cálculo de riesgo de los componentes.

Como resultado de este proceso se obtienen las siguientes matrices de riesgo para cada equipo de perforación, en donde se muestran la cantidad de elementos para cada componente:

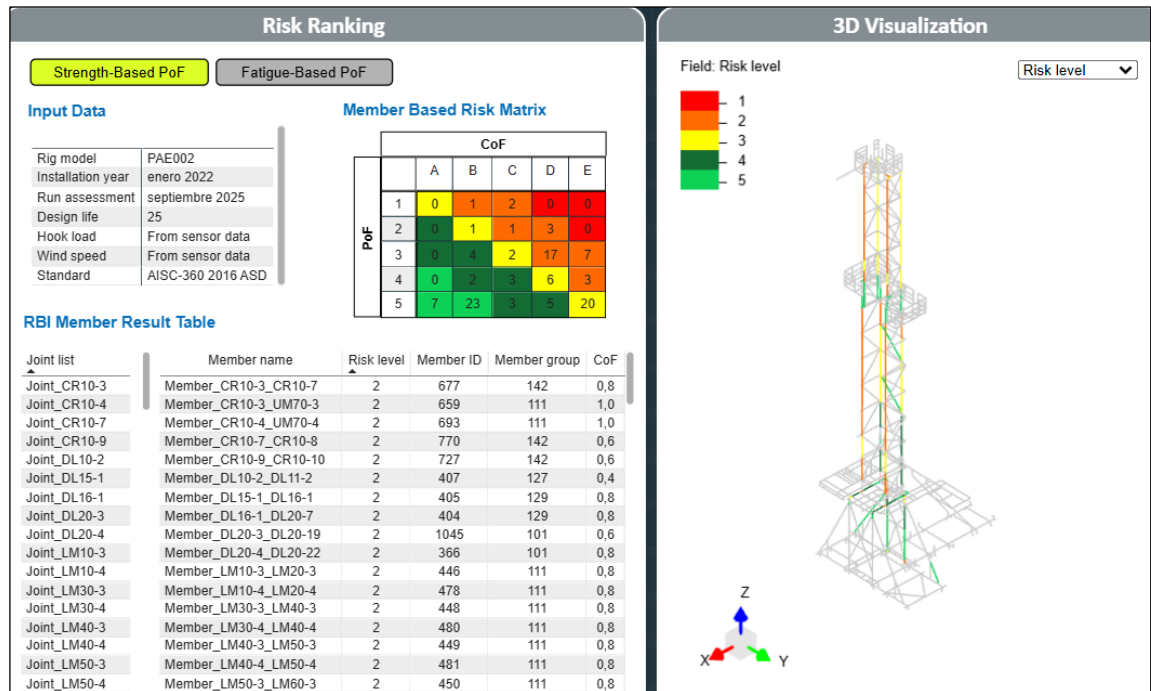


Figura 6. Análisis de RBI por Tensiones durante Operación.

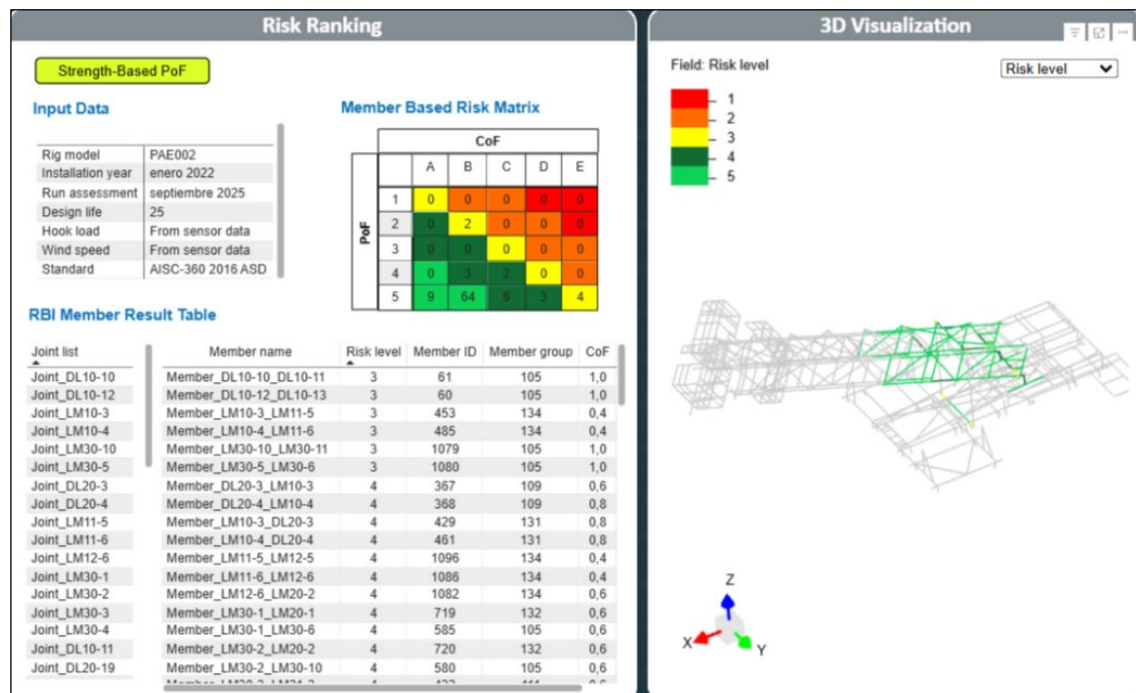


Figura 7. Análisis de RBI por Tensiones durante DTM.

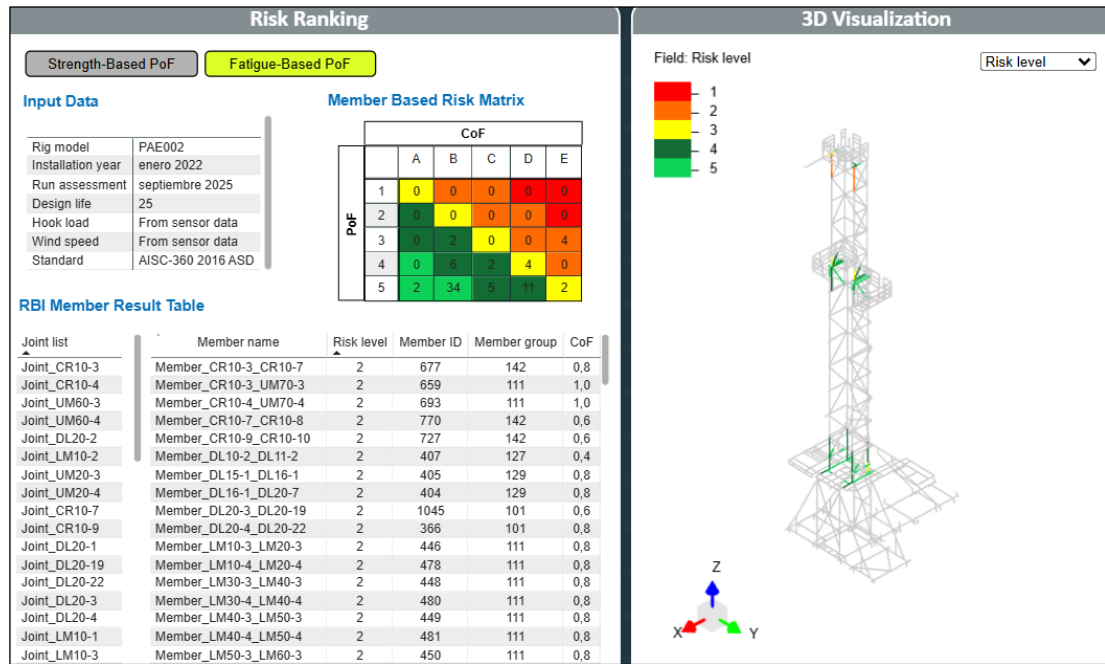


Figura 8. Análisis de RBI por Fatiga durante Operación.

4.5. Optimización del Plan de Inspección

A partir de los niveles de riesgo obtenidos se definen las frecuencias y métodos de inspección para cada elemento.

Se analizaron un total de 309 elementos de dos equipos de perforación, de los cuales se deberán adecuar el plan vigente de 168 componentes. Esto implica los planes para el 54% de los componentes analizados.

La adecuación se debe hacer sobre los siguientes puntos:

- Incluir en plan trimestral (al menos por un año): 18 elementos identificados con riesgo alto pero sin evidencia antigua de daño.
- No contemplar del plan trimestral: 48 elementos.
- No contemplar CAT III PLUS (sólo realizar inspección visual spot): 102 elementos.

Los Puntos a Inspeccionar, su metodología y proceso de ejecución quedarán plasmados en el Reporte de Inspección para cada uno de los equipos.

5. Conclusiones

El análisis estructural de los PAE Rigs, mediante la implementación de un Gemelo Digital, versus un análisis estático por FEA, arrojó como valor agregado una ponderación de puntos críticos detectados y esperables, no solo por las tensiones mecánicas calculadas en un FEA convencional como el usado en las VTA, sino que permite incorporar dos ponderaciones adicionales, como ser: el Análisis de Riesgo debido a tensiones propias de la operación continua, y el Análisis de Riesgo a la Fatiga Mecánica. Obteniendo así, un análisis total de los elementos estructurales sometidos a Tensión y Riesgo, no solo para un estado actual, sino para una condición futura a través del análisis de Fatiga.

En los siguientes diagramas vemos las diferencias de los alcances detallados en el párrafo precedente.

Partimos de:

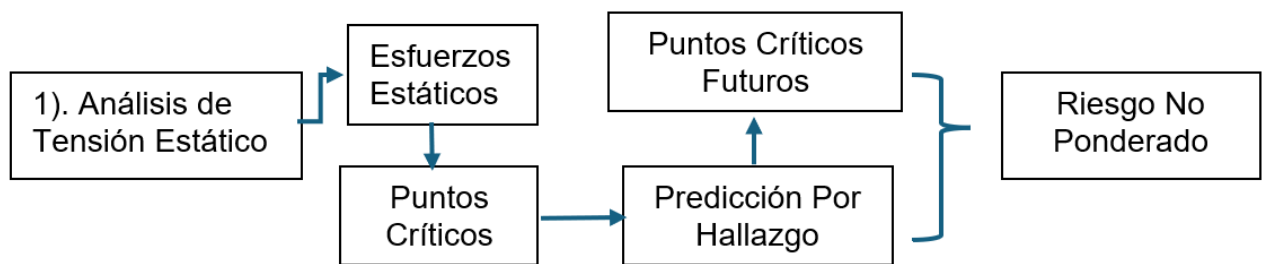


Figura 9. Diagrama implementación Análisis FEA Estático. Modelo no Predictivo.

Alcanzamos con el Gemelo Digital:

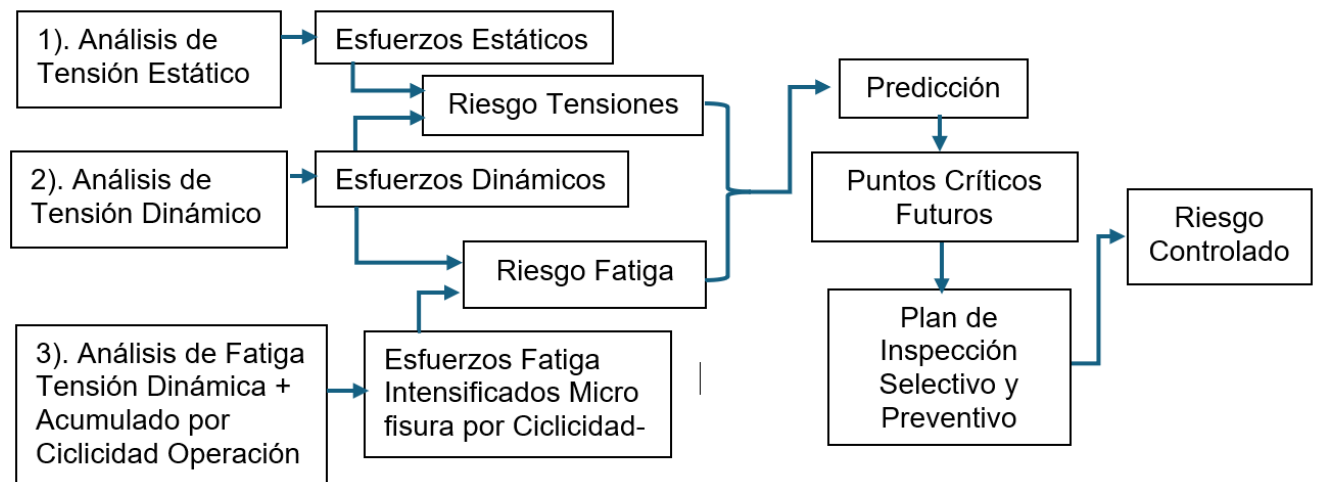


Figura 10. Diagrama implementación Análisis FEA Estático + Gemelo Digital. Modelo Predictivo de Riesgo Controlado.

Los beneficios de la implementación del Gemelo Digital impactan directo sobre la predicción de los puntos críticos no visualizados por el Análisis Estático, y particularmente, sobre los puntos que fallarán en el mediano y largo plazo. Haciendo de esto, una inspección dirigida y focalizada, con carácter predictivo sobre los puntos en cuestión, previniendo así fallas y colapsos estructurales imprevistos.

6. Bibliografía

- API 580 Risk-Based Inspection
- API 581 Risk-Based Inspection Methodology
- API RP 2SIM Structural Integrity Management of Fixed Structures

7. Curriculum Vitae

Pablo Adrián Cutini

Puesto: Ingeniero de Integridad Corporativa

Educación: Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica Nacional FRBB

Trayectoria: 20 años de experiencia en stress análisis y monitoreo basado en condición, 10 años en ingeniería de proyectos y 6 años trabajando en Pan American Energy como Ingeniero de Integridad.

Jonathan Moreno

Puesto: Ingeniero de Integridad Corporativa

Educación: Ingeniero Químico, Universidad Nacional del Sur (2016)

Trayectoria: 9 años de experiencia en ensayos no destructivos e integridad mecánica y corrosión. 6 años trabajando en Pan American Energy como Ingeniero de Integridad.

Francisco Raúl Ortiz Inostroza

Puesto: Líder regional integridad Facilities

Educación: Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica Nacional FRBB (2001), Diplomatura Gestión Activos, Universidad Austral (2015), Project Manager, Universidad de Belgrano (2014)

Trayectoria: 18 años de experiencia en integridad mecánica desempeñándose como Líder regional integridad Facilities (Dic 2020 – Presente, CABA), Coordinador integridad (Mar 2019 - Dic 2020, Neuquén), Coordinador integridad mecánica (Sep 2017 - Feb 2019, Neuquén), Key User SAP (Jun 2014 - Sep 2017, CABA), Integrity Engineer (Oct 2010 - Jun 2014, Chubut), Ingeniero Mecánico (Oct 2007 - Oct 2010, Chubut).

8. Anexo: Detalle y nomenclatura de los Componentes

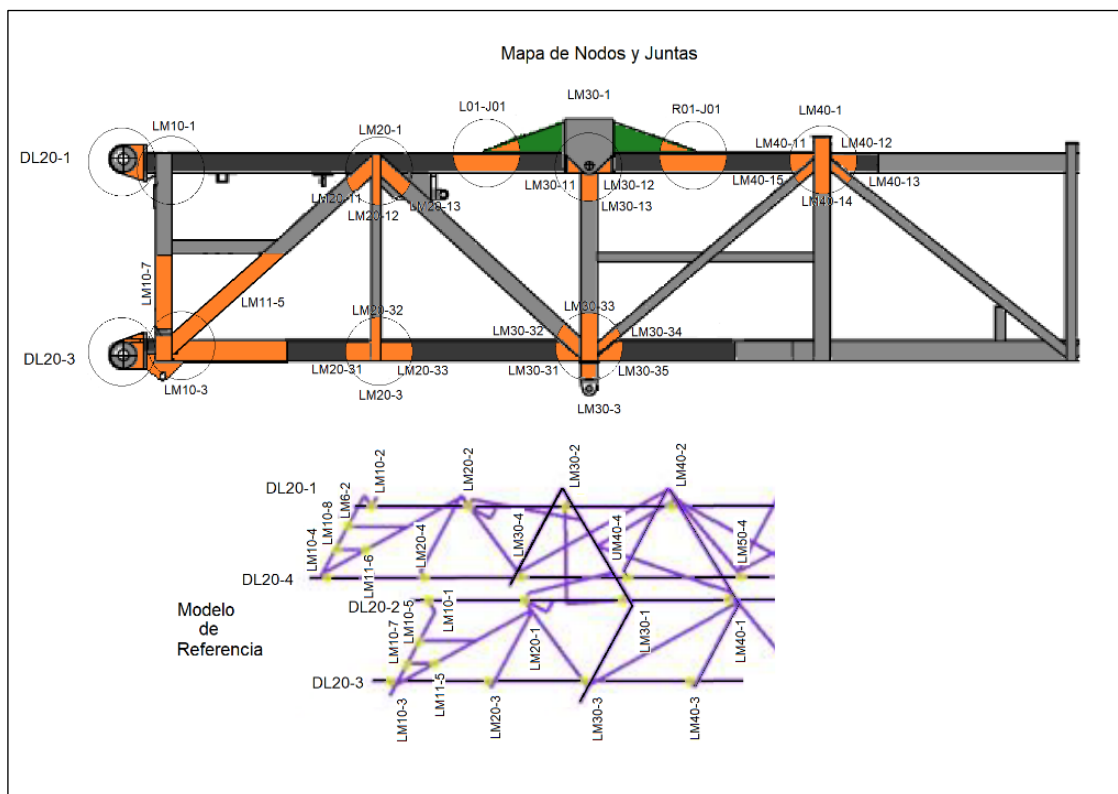


Figura 11. Puntos críticos de las estructuras – Tramo Inferior.

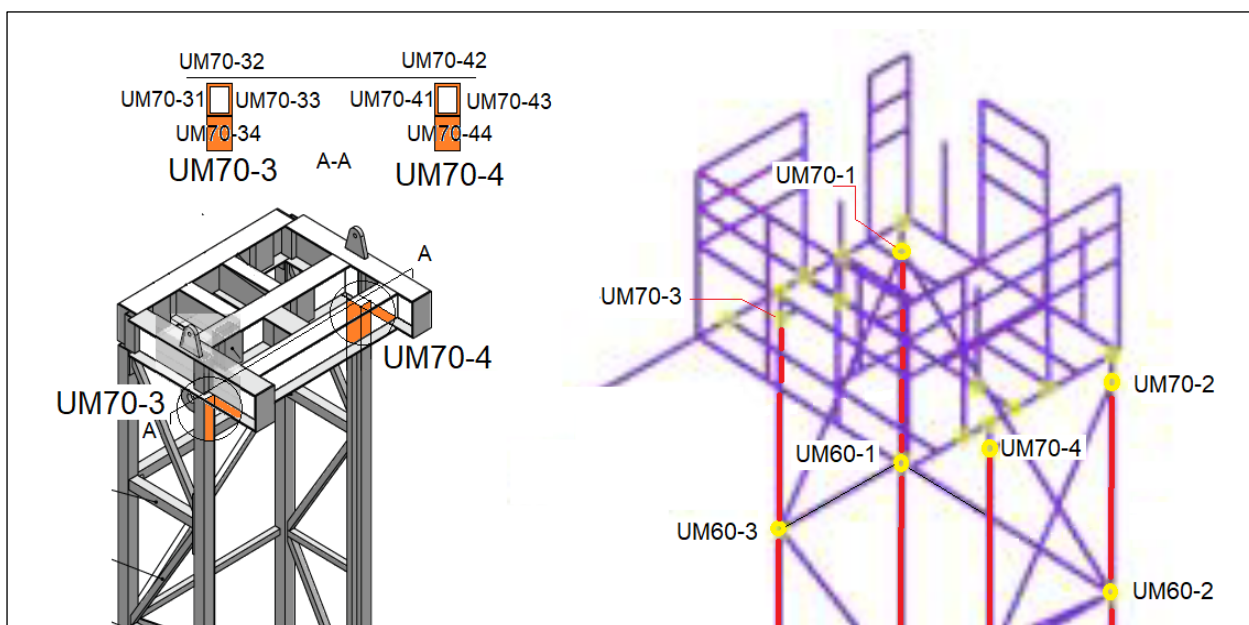


Figura 12. Puntos críticos de las estructuras – Tramo superior.

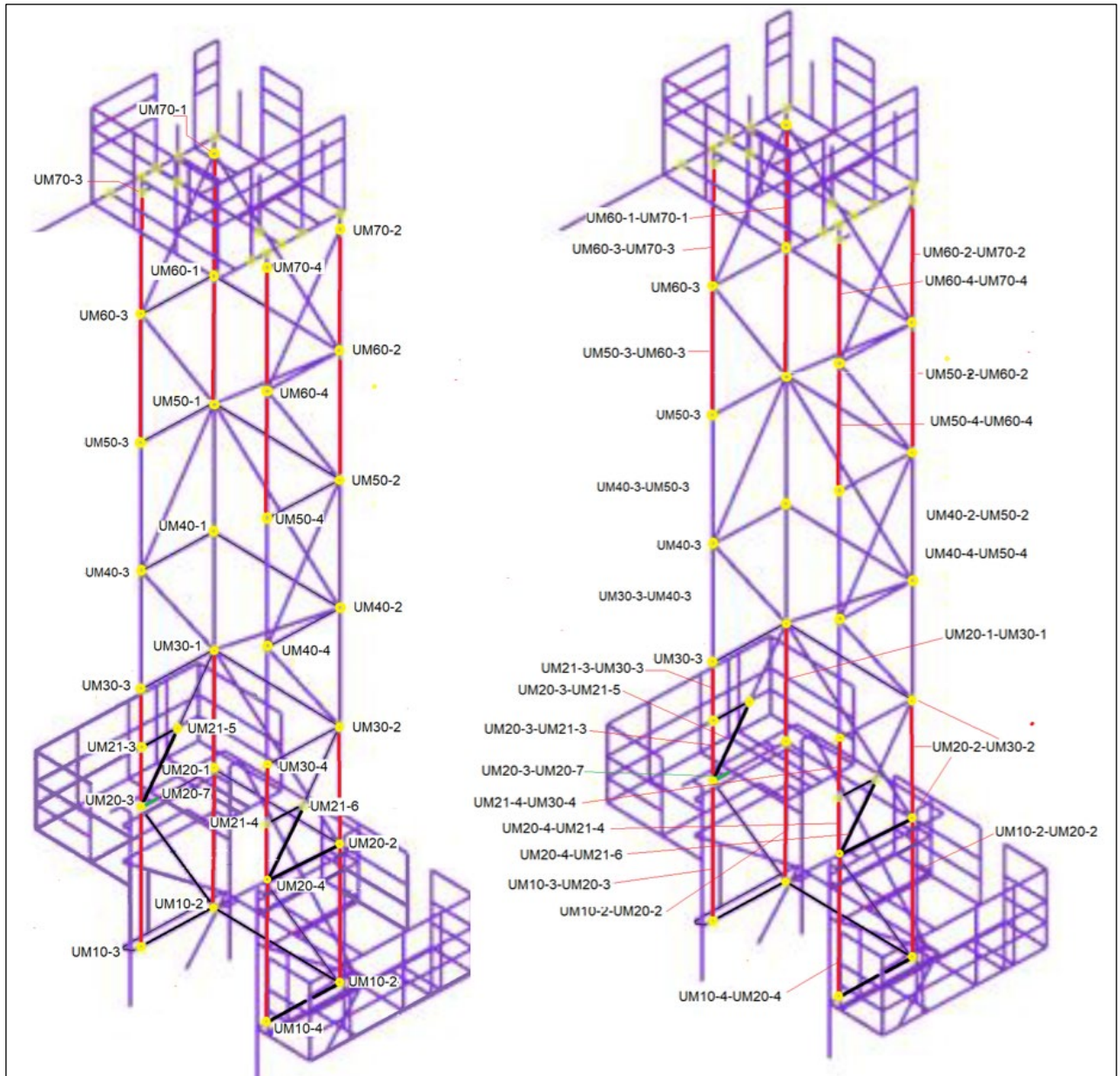
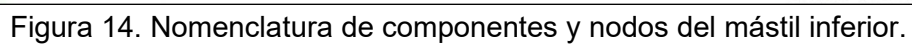


Figura 13. Nomenclatura de componentes y nodos del mástil superior.



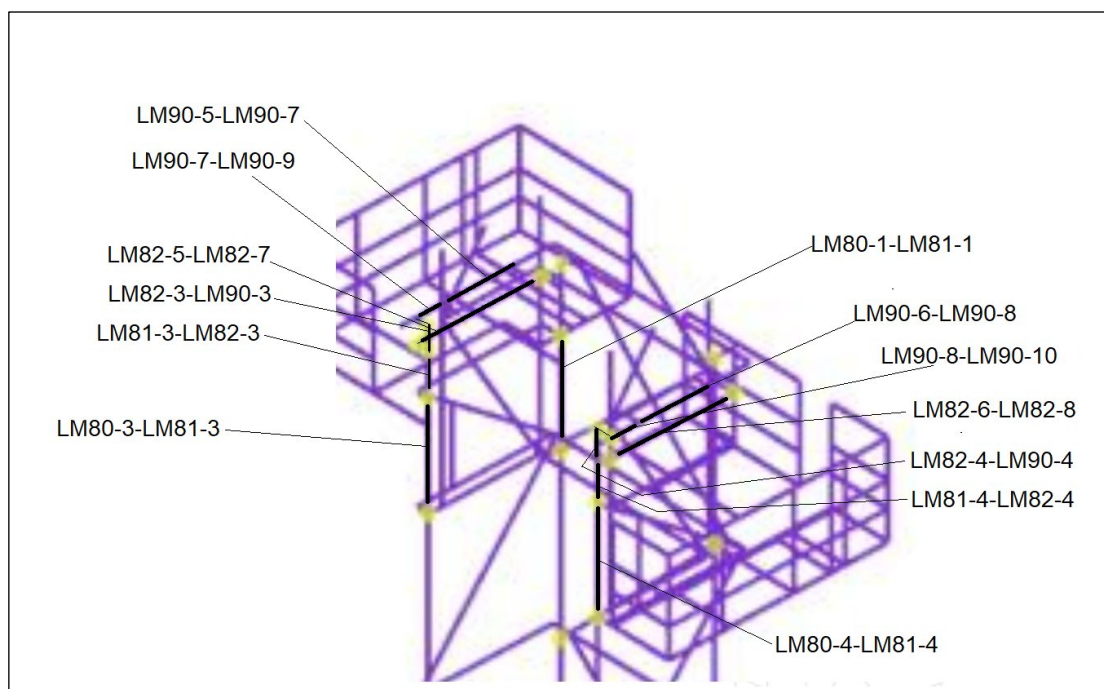


Figura 15. Nomenclatura de componentes y nodos de Traba Cajón.

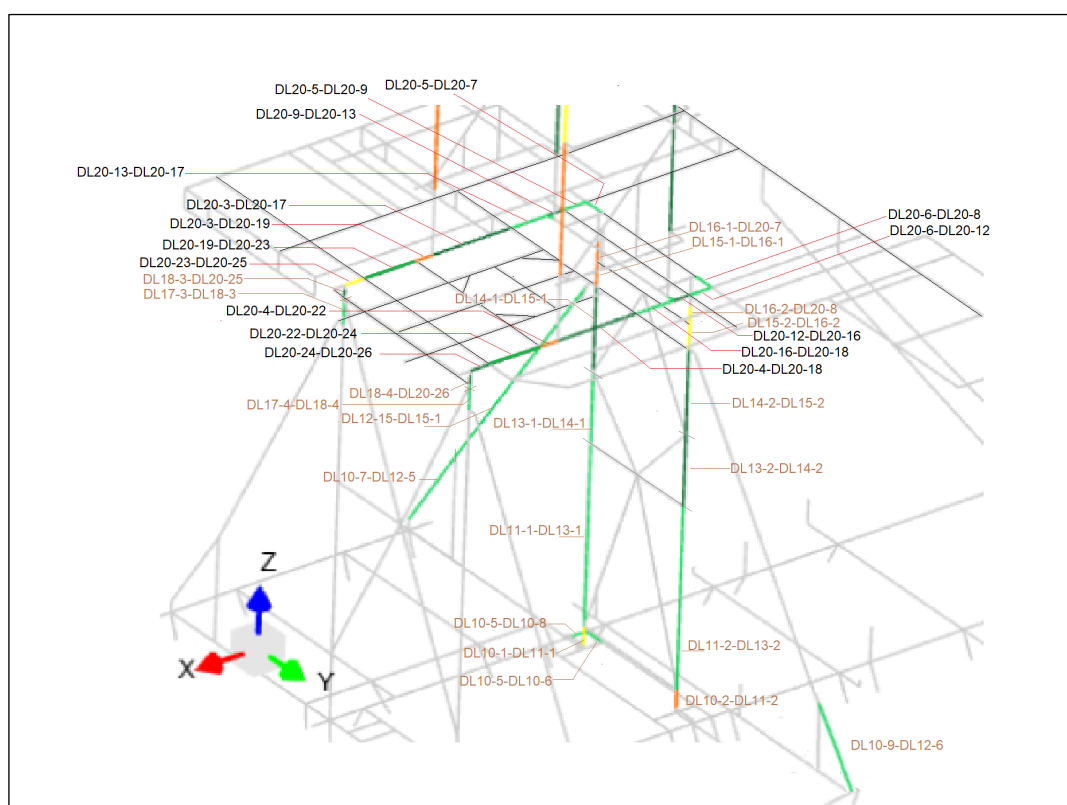


Figura 16. Nomenclatura de componentes y nodos de Subestructura.