

## NUESTRA VISIÓN

Los reactores de hidrocrackeo son equipos críticos de refinería que operan a altas temperaturas y presiones en presencia de hidrógeno para convertir fracciones pesadas de hidrocarburos en productos más ligeros y de mayor valor.

A medida que estos reactores envejecen y sus escenarios operativos evolucionan con la introducción de materias primas bio-basadas, la conciencia sobre la integridad de los activos juega un papel cada vez más importante para asegurar la operación fiable de la unidad. Esto convierte a los Digital Twin en un vector tecnológico clave para la transformación del modelo operativo de CEPSA.

## ALCANCE

Construcción de un Gemelo Digital basado en elementos finitos que considere el estado real del equipo, procesando el histórico de operación desde su puesta en marcha.

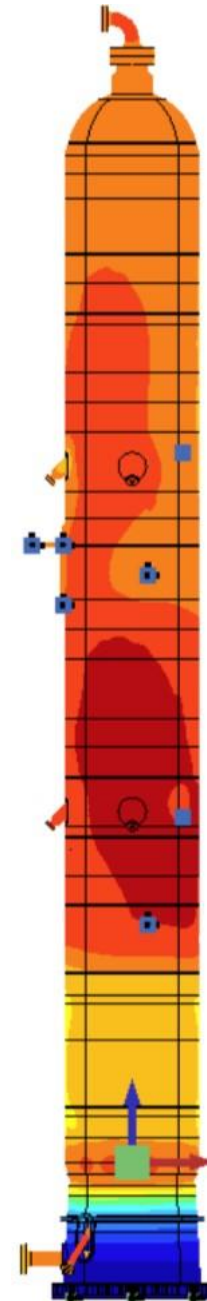
Despliegue con conectividad en tiempo cuasi-real, permitiendo analizar el margen de seguridad contra fractura frágil durante la operación, monitorizar el daño local de fatiga, e identificar situaciones de riesgo relacionadas con la integridad estructural.

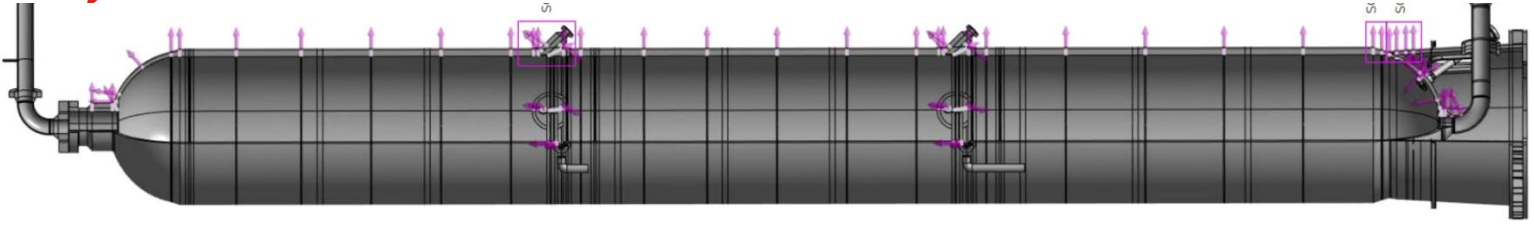
Validación independiente del modelo para modificar los procedimientos de operación en base a los resultados obtenidos.

Adopción de la herramienta e implantación de su uso en el día a día de la operación.

## BENEFICIOS

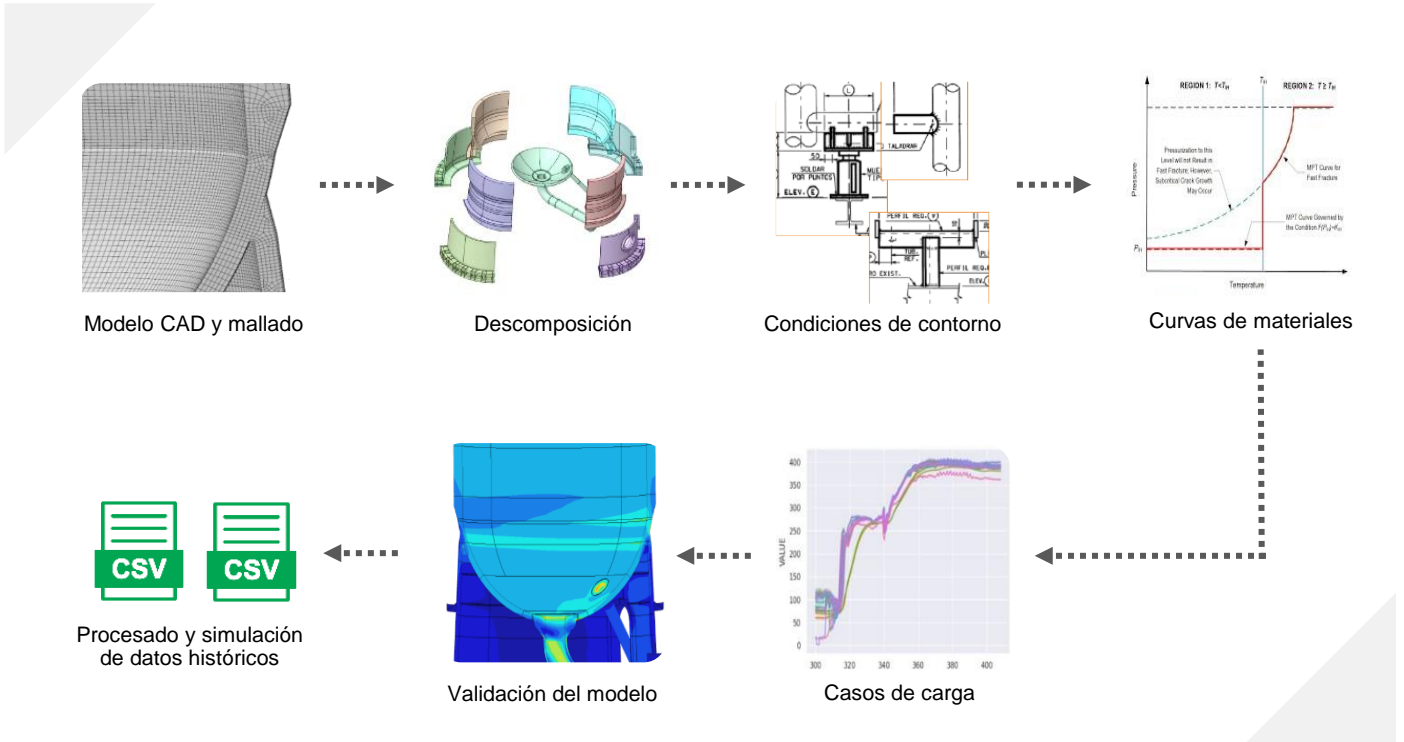
- Concienciación sobre el impacto de la operación en la integridad del equipo, permitiendo analizar eventos para prevenir paradas no programadas y evitar daños en el equipo en el futuro
- Optimización de curvas de arranque dentro de los límites de seguridad definidos, reduciendo el tiempo de parada
- Extensión de hasta 5 años en la vida útil del reactor
- Automatización de estudios Fitness-For-Service<sup>1</sup>, reduciendo costes de mantenimiento e inspección





# El camino hacia el Gemelo Digital

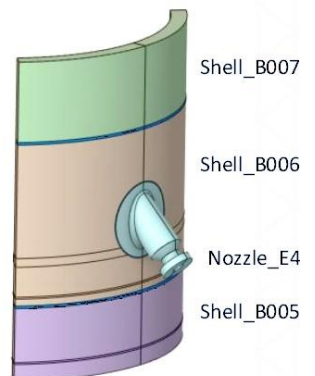
Para la primera fase del proyecto, trabajamos con un equipo de expertos en elementos finitos y metalurgia para crear el modelo CAD, configurar la simulación térmica y estructural, y calcular las curvas de materiales. Después, simulamos una variedad de casos de carga estáticos y dinámicos para validar los resultados del software, y cargamos los datos históricos en el modelo para capturar la evolución de la metalurgia y representar con precisión su estado actual. Una vez configurado el modelo, pudimos realizar análisis “What-If” para simular el comportamiento real del reactor en diferentes escenarios como, por ejemplo, un arranque más agresivo de lo habitual o una situación de emergencia.



## SOLUCIÓN DE SOFTWARE

El software utilizado se basa en una implementación optimizada del método de elementos finitos (RB-FEA), que predice como el reactor responde a las cargas termo-mecánicas que actúan sobre él y simplifica la simulación manteniendo sólo los grados de libertad más relevantes del sistema.

Esto permite simular en tiempo cuasi-real (5-10 minutos de desfase) modelos complejos que tardarían horas en un software tradicional de elementos finitos sin sacrificar precisión en los resultados.



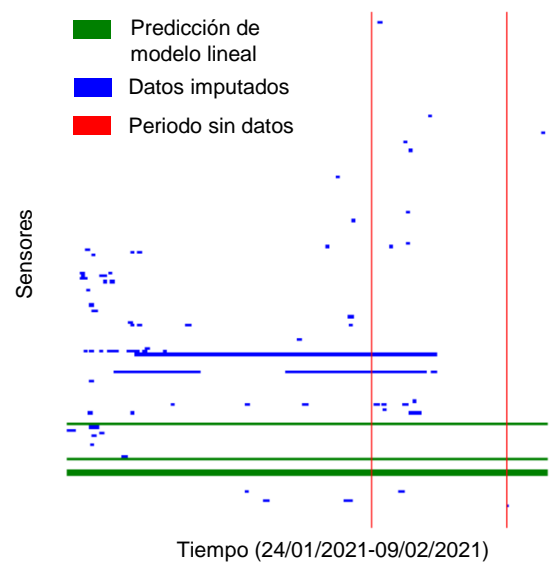
# Conectividad en tiempo real

En la segunda fase, desplegamos el Gemelo Digital con conectividad a los datos de operación. Estos datos se procesan a través de algoritmos de limpieza antes de utilizarse como input para el modelo.

## LIMPIEZA DE DATOS

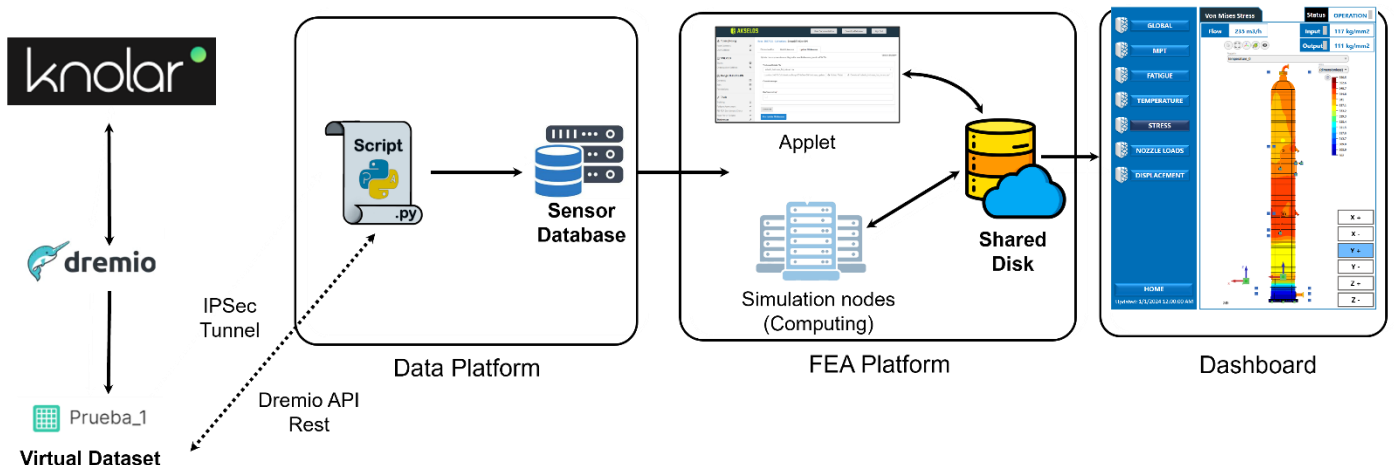
Para garantizar la calidad de los datos de 180 sensores de temperatura y presión procesados, desarrollamos un algoritmo de limpieza en Python capaz de identificar problemas como valores estáticos, pérdidas puntuales de conexión y valores incompatibles con la operación del reactor.

Los datos de baja calidad, que suponen alrededor de un 5% del total, son sustituidos por datos sintéticos, alimentando el Gemelo Digital con datos de entrada más fiables. En la gráfica se muestra cómo actúa el algoritmo. La región en blanco representa datos de buena calidad, mientras que los datos marcados en verde son generados por modelos de regresión lineal<sup>2</sup> y los marcados en azul son sustituidos en base a la relación con otros sensores cercanos.



## MODELO DE ARQUITECTURA

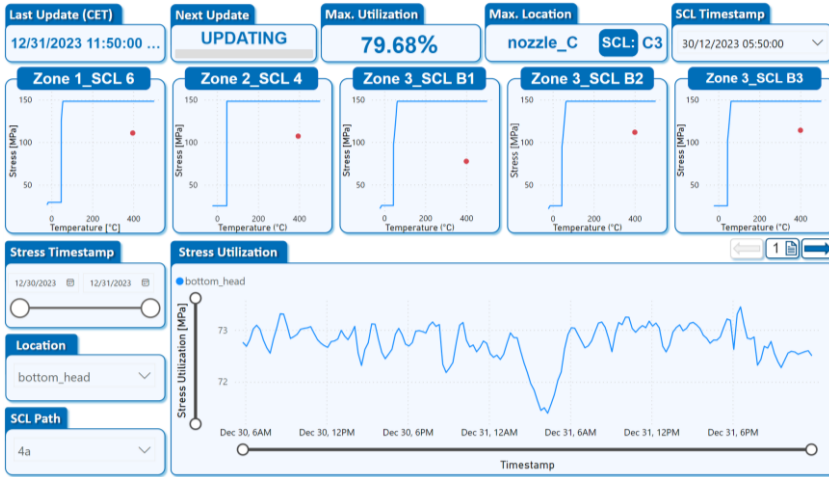
Cada 5 minutos, el sistema importa los últimos datos del historificador de procesos. Tras pasar por el algoritmo, los datos limpios se ingestan en una base de datos intermedia, desde la que viajan a la plataforma de elementos finitos para ser procesados. Los resultados post-procesados, como las distribuciones de temperatura y la linealización de tensiones, se muestran finalmente en dashboards personalizados basados en PowerBI.



2. Los modelos de Machine Learning basados en regresión lineal permiten explicar directamente los resultados en función de las variables predictoras

# Explotación de los datos

Para que los usuarios finales puedan acceder a los resultados generados por el modelo, hemos diseñado cuadros de mando con diferentes enfoques.



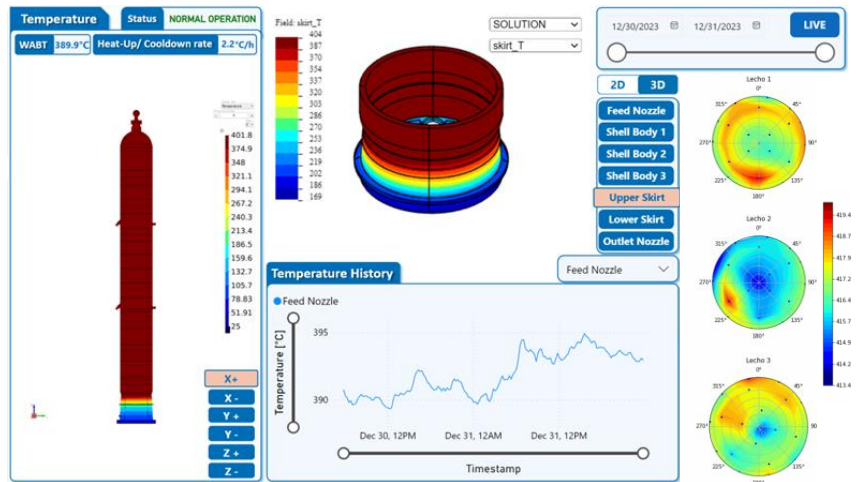
Fuente: CEPSA

## FRACTURA FRÁGIL

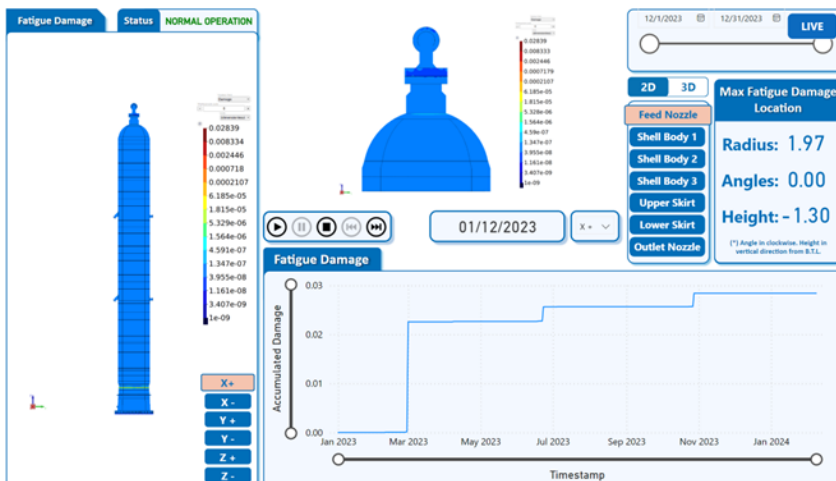
Esta pantalla muestra el margen de seguridad contra fractura frágil (mecanismo de fallo asociado a la presencia de hidrógeno). Para ello, se representa el punto de operación real en las curvas MPT<sup>3</sup>, así como el porcentaje máximo de utilización y su componente asociado. Esto permite monitorizar los márgenes durante los arranques y paradas del reactor y optimizar la puesta en marcha de manera segura.

## TEMPERATURA

Esta visualización muestra una distribución de temperatura en la pared del recipiente en 3D, permitiendo analizar la evolución de la temperatura en zonas críticas del reactor como el Hot Box<sup>4</sup> mediante animaciones. Además, un mapa de calor de los lechos internos del reactor permite diagnosticar problemas en la actividad del catalizador y detectar condiciones anómalas en el fluido.



Fuente: CEPSA



Fuente: CEPSA

## FATIGA

A lo largo de su vida, el equipo acumula ciclos de operación que se traducen en daño de fatiga. Este dashboard permite calcular la vida remanente a fatiga del equipo en función de su historial de operación, sirviendo como base para planificar las inspecciones y mejorar los procedimientos operacionales para alargar la vida del equipo.

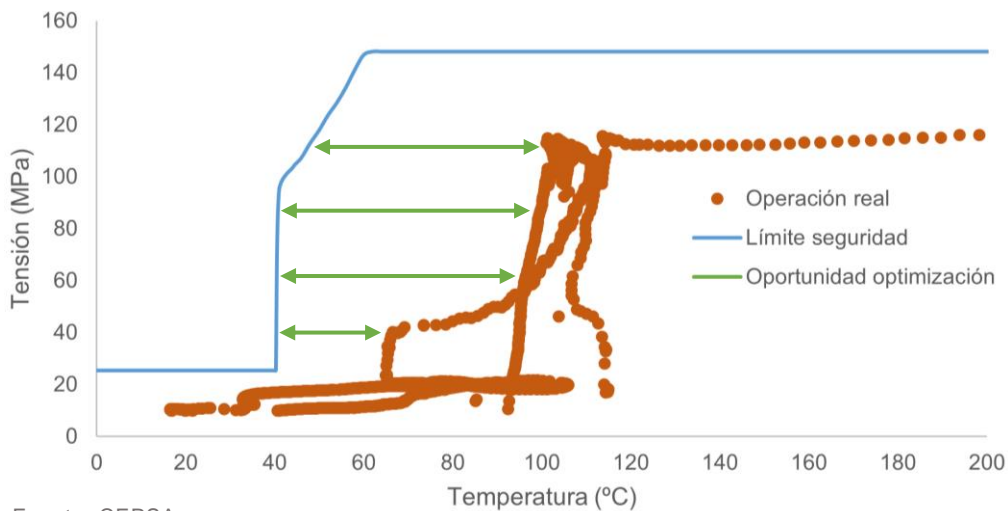
3. Las curvas MPT (Minimum Pressurization Temperature) determinan la temperatura mínima a la que un material puede ser presurizado de manera segura sin riesgo de fractura frágil  
 4. La zona del Hot Box es la cámara de aire en el fondo del reactor diseñada para reducir el gradiente térmico en el faldón mediante convección y radiación

# Resultados

Tras el despliegue, hemos verificado un potencial de ahorro de 230 k€/año y la oportunidad de alargar en 5 años la vida del equipo mejorando los procedimientos operacionales.

## OPTIMIZACIÓN DE ARRANQUE

Analizando el margen de seguridad de los componentes más críticos durante las puestas en marcha, existe una oportunidad para reducir el tiempo de arranque en 12 horas de manera segura. Con un lucro cesante de la unidad de 700 k€/día y una frecuencia de paradas de 18 meses, esto supone un ahorro de más de 230 k€/año. A continuación, se muestra una representación gráfica de la oportunidad de optimización en base a los datos de la tubuladura de entrada durante una parada en 2023.



Fuente: CEPSA

## EXTENSIÓN DE VIDA

Para alargar la vida remanente del equipo, se han analizado diferentes períodos de operación y cuantificado su tasa de daño a fatiga. Estas comparaciones han permitido identificar los factores operacionales que tienen una mayor influencia sobre la vida remanente y demostrar el impacto de las decisiones de operación sobre la salud del reactor. Este conocimiento cobrará todavía más importancia en futuras plantas de biocombustibles, dado que la variabilidad en la composición de las materias primas y la mayor frecuencia de cambios de catalizador tendrán un impacto notable en la fatiga de los equipos.

