



# Acelera la transformación digital de tu PYME



## INFORME TECNOLÓGICO – Marzo 2023

### Uso de gemelos digitales en el desarrollo de productos – caso de aplicación para fusibles mecánicos

Elaborado por:  **AIDIMME** 



VICEPRESIDENCIA  
PRIMERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
DE ASUNTOS ECONÓMICOS  
Y TRANSFORMACIÓN DIGITAL

SECRETARÍA DE ESTADO  
DE DIGITALIZACIÓN  
E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

red.es



UNIÓN EUROPEA

Fondo Europeo de Desarrollo Regional

*“Una manera de hacer Europa”*

## 1 Los gemelos digitales

Tal y como indicamos en el informe de agosto 2022 “CONSTRUYENDO UN GEMELO DIGITAL”:

*Los Gemelos Digitales (GD) son representaciones virtuales y dinámicas de sistemas, productos o servicios que permiten simular, con mayor o menor grado de detalle, el comportamiento de estos incluso antes de existir físicamente. Para crear estas representaciones virtuales se debe establecer, en un lenguaje comprensible a nivel computacional, la relación causa-efecto entre los elementos fundamentales del sistema a reproducir. La forma de establecer estas relaciones puede ser diversa: por ejemplo, si se trata de simular el comportamiento de un producto que no existe, se deben establecer y depurar ecuaciones teóricas que reflejen la realidad física.*

En comparación con las pruebas físicas, la simulación puede generar enormes ahorros en términos de tiempo y coste, además de evitar la aparición de residuos y situaciones potencialmente peligrosas.

Las pruebas físicas para validar un producto antes de su lanzamiento pueden requerir un intervalo de tiempo relativamente largo debido a la necesidad de preparar y construir muestras y configuraciones de pruebas, las limitaciones impuestas por la capacidad del laboratorio. Además, normalmente un proceso de diseño requiere varias iteraciones, y dado que en cada iteración hay que esperar a los resultados de la prueba anterior, esta penalización de tiempo puede ser elevada.

Para acortar el plazo en el lanzamiento de los productos, el uso de gemelos digitales para el desarrollo de productos viene usándose desde hace décadas a partir de softwares de simulación que usan herramientas de ingeniería asistida por ordenador (CAE), como el método de elementos finitos (FEM) y la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Estas herramientas permiten a los diseñadores visualizar, cuantificar y predecir con precisión múltiples características de un producto o de un dispositivo durante su fase de desarrollo, de forma que se pueden reducir drásticamente los costes y los tiempos de prueba, ya que la creación de un prototipo virtual del producto o dispositivo permite hacer pruebas virtuales completas con un elevado nivel de precisión.

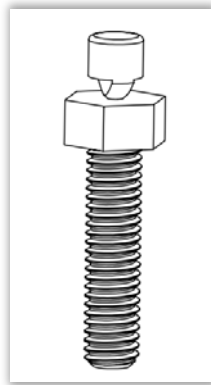
Para aprovechar estas tecnologías debemos contar con el software adecuado, ordenadores de alto rendimiento para acortar al máximo los tiempos de procesamiento, y, evidentemente, del personal con el conocimiento necesario para elaborar correctamente el modelo de simulación y las configuraciones del solucionador numérico (solver).

Llegados a este punto es importante señalar que, si bien la utilidad de los gemelos digitales en el desarrollo del producto es incuestionable, su aplicación efectiva puede resultar difícil, y para encontrar la solución óptima a cada problema abordado con un gemelo digital se necesita un enfoque diferente.

En este informe se describe con detalle una aplicación práctica desarrollada por AIDIMME en la que se usa un software de simulación para la creación de un gemelo digital de un perno con una aplicación de diseño de ingeniería asistido por ordenador llamada HyperWorks de Altair (<https://altair.com/hyperworks>).

El objetivo del gemelo digital que se describe a continuación es calcular la sección de la cabeza de un perno para su uso como fusible mecánico en una aplicación concreta, para lo cual se plantea el uso del método de los elementos finitos para realizar los cálculos de las tensiones equivalentes de von Mises y determinar la sección de la entalla óptima para asegurar la rotura en caso de bloqueo, pero que al mismo tiempo garantice el correcto funcionamiento del mecanismo en el que se inserta el fusible en condiciones normales.

Con esta herramienta se generó un modelo CAD 3D del perno tal y como muestra la siguiente imagen.



**Ilustración 1. Fusible mecánico con forma de entalla en un perno**

A continuación, incluimos una información de referencia sobre los fusibles mecánicos, y se describe el proceso de desarrollo del gemelo digital de un fusible mecánico para su diseño y validación.

## **2 Uso de fusibles mecánicos para la prevención de roturas graves en elementos de transmisión.**

La rotura grave de un elemento de transmisión en una máquina puede deberse al bloqueo de dicho elemento de transmisión. Cuando se produce el bloqueo, el motor entrega la potencia al elemento de transmisión que no puede moverse. Esto causa un aumento de la deformación de los materiales que puede sobrepasar el límite elástico del material y producir deformaciones permanentes o la rotura del elemento de transmisión. Una posibilidad para evitar la rotura sería el uso de un motor incapaz de producir la potencia necesaria para causar la rotura. Esta solución ralentiza la velocidad de funcionamiento de la máquina, lo cual la hace poco competitiva para

su puesta en el mercado. Otra posibilidad sería la medición del consumo eléctrico del motor para cortar la alimentación eléctrica al mismo cuando se superase un determinado umbral de seguridad. Esta solución no impide que la inercia del sistema mecánico le dé un golpe de ariete al elemento de transmisión bloqueado que podría romperse. La mejor solución sería el uso de un elemento de transmisión que proteja contra la rotura al elemento que queremos salvaguardar. Dicho elemento de protección no permitirá que la potencia del motor llegue al elemento de transmisión bloqueado, protegiéndolo contra la rotura. Este elemento de protección se llama fusible mecánico y se debe colocar entre el motor y el elemento de transmisión que queremos salvaguardar.

Al igual que un fusible eléctrico se funde cuando se produce una intensidad de la corriente eléctrica excesiva, el fusible mecánico se rompe cuando se produce un esfuerzo mecánico excesivo. En el primer caso se interrumpe el flujo de la corriente eléctrica y se protege a los componentes eléctricos del daño que pudiera causar una intensidad de la corriente eléctrica excesiva y, en el segundo caso, se interrumpe el movimiento mecánico de la cadena de transmisión y se protege a los componentes mecánicos del daño que pudiera causar un esfuerzo mecánico excesivo.

El fusible eléctrico emplea un hilo metálico que se funde al superarse la intensidad máxima permitida por un equipo eléctrico, cosa que no debe ocurrir bajo circunstancias normales de funcionamiento pero que puede ser causada por un cortocircuito fortuito. Y, al fundirse el hilo metálico, se interrumpe el suministro eléctrico y se protege al equipo. El equipo no funcionará hasta que se retire el fusible fundido y se coloque uno nuevo en su lugar. En el pasado el hilo metálico era de plomo, por lo que, cuando se iba la luz de la casa, se decía: “Se han fundido los plomos”. Ahora que el plomo está prohibido en Europa, los fusibles eléctricos emplean aleaciones de estaño.

El fusible mecánico se emplea como parte de una cadena de transmisión mecánica y, al igual que el fusible eléctrico, el fusible mecánico se rompe cuando se supera el límite de su resistencia mecánica. Es más económico que se rompa un fusible mecánico a que se rompa el mecanismo. Al romperse el fusible mecánico, la cadena de transmisión aguanta abajo pierde la conexión mecánica con la fuente del esfuerzo mecánico y se detiene, quedando protegida contra daños irreparables que pudiera haber causado un esfuerzo mecánico excesivo. Es como dice el refrán popular: “La cadena se rompe por el eslabón más débil”. En este caso, el eslabón más débil es el fusible mecánico que debe diseñarse a conciencia para ser el único elemento de la cadena de transmisión mecánica que se rompa cuando se produzca un esfuerzo mecánico excesivo. De esta manera el fusible mecánico se sacrificará y protegerá a los demás componentes de la cadena de transmisión. Si, por ejemplo, una reductora con ruedas dentadas se bloquease durante el funcionamiento y no hubiese un fusible mecánico para protegerla, la fuerza del motor podría hacer que los dientes de la rueda mecánica saltasen por los aires, produciendo un daño irreparable a la rueda dentada. Pero, si se colocase un fusible mecánico en la cadena de transmisión, el fusible se rompería antes de que la rueda dentada sufriese ningún daño. El coste

de la sustitución de un fusible mecánico roto es menor que el coste de la sustitución de la rueda dentada rota.

El fusible mecánico puede construirse con un perno de acero cuyo vástago haya sido debilitado mediante la reducción de su diámetro. Esta operación de mecanizado se puede realizar con la ayuda de un torno. La persona encargada de diseñar el fusible mecánico debe estudiar concienzudamente el límite elástico del material del perno para llevarlo a la rotura cuando se supere el límite superior de esfuerzo del diseño mecánico. Esto quiere decir que el coeficiente de seguridad de la zona debilitada del perno es 1 (cuando normalmente es superior, pudiendo llevar a 2 o incluso 3 en función de la aplicación), por lo que el perno se encontraría en la frontera entre funcionar bien y funcionar mal o romperse al producirse la condición de exceso de carga en el eje conducido.

Los fusibles mecánicos también pueden fabricarse con un material de menor resistencia mecánica que el resto de los componentes presentes en la cadena de transmisión mecánica, como por ejemplo con un material plástico.

Cuando la transmisión es rotativa, y se puede usar un eje principal sólido insertado en un eje secundario hueco, cabe la posibilidad de taladrar un agujero pasante de lado a lado y colocar un perno de cizallamiento a modo de pasador de seguridad que bloquee a ambos ejes. Si se produjese el bloqueo del eje secundario, el perno de cizallamiento sufriría un exceso de esfuerzo cortante y se rompería, permitiendo que el eje principal siga girando cuando el eje secundario esté bloqueado. Esta solución dispone de una amplia oferta de materiales para el perno de cizallamiento, por lo que se puede diseñar para distintos límites de par. En ambientes corrosivos hay que tener especial cuidado en la protección contra la corrosión de los ejes y el perno, ya que los productos de corrosión pueden causar que los dos ejes se unan y falle el mecanismo de protección contra el bloqueo del eje secundario.

En el caso del automóvil, la Renault fue la primera marca en reducir el espesor de la chaveta de la polea del árbol de levas y las válvulas. Esta reducción del espesor produce un debilitamiento que convierte a la chaveta en un fusible mecánico. Si se bloquease el árbol de levas, la pequeña chaveta se rompería, permitiendo que la polea continúe girando sin causar la rotura de la correa de distribución que produciría una avería muy grave del motor.

Otra alternativa sería emplear un embrague mecánico ajustable entre el eje principal y el secundario. El embrague patinaría al producirse el bloqueo del eje secundario.

También existe el acoplamiento de accionamiento magnético que emplea la fuerza magnética de atracción para mantener magnéticamente unidos a los ejes principal y secundario. En la terminación de los ejes se colocan sendos discos con imanes muy poderosos. Una distancia de separación muy pequeña, llamada entrehierro, separa a los dos discos para impedir su contacto mecánico. Es muy importante minimizar la distancia de separación entre los discos para maximizar la fuerza magnética del acoplamiento. Estas fuerzas magnéticas alinean a los dos

discos para que puedan girar de manera síncrona. En la práctica, el entrehierro debe tomar en cuenta el efecto de la dilatación de los metales debida a un aumento de la temperatura del ambiente. Si se produjese el bloqueo del eje conducido, la fuerza magnética del acoplamiento podría ser vencida por el par del eje conductor y se produciría el deslizamiento del eje conductor con respecto al eje conducido (que permanecería bloqueado). Una ventaja adicional de este acoplamiento de accionamiento magnético es que no transmite las vibraciones de un eje al otro eje. Debido a la ausencia de contacto mecánico entre los ejes conductor y conducido, el acoplamiento de accionamiento magnético no produce calor ni se desgasta, por lo que no requiere mantenimiento. Una aplicación industrial (en las industrias química y petroquímica) son las bombas de trasiego de productos químicos, donde la turbina que impulsa al fluido forma parte de un disco magnético situado dentro de un cerramiento estanco y la fuerza necesaria para su giro viene desde fuera del cerramiento con otro disco magnético conectado al eje de un motor que genera el par necesario para la operación de la bomba de trasiego. Evidentemente el cerramiento estanco debe fabricarse con un material que permita el paso libre del campo magnético. La estanqueidad del cerramiento evita las fugas de fluido que podrían ser muy peligrosas.

El embrague electromagnético ofrece la misma protección que el embrague mecánico ajustable o el acoplamiento de accionamiento magnético, pero tiene un funcionamiento distinto. Al igual que en otros embragues, en el embrague electromagnético hay dos platos de embrague que se juntan en el momento en que se activa una señal eléctrica que alimenta a un electroimán que aporta la fuerza necesaria para unirlos. Al desactivarse la señal eléctrica del embrague electromagnético, un muelle apartará a los dos discos de embrague y se perderá la unión entre el eje conductor y el eje conducido. Mientras el embrague electromagnético esté activado, si se bloquease el eje conducido, los platos de embrague patinarían, permitiendo que el eje conductor siguiese girando (sin causar la rotura del mecanismo bloqueado).

En conclusión, el diseñador mecánico dispone de distintas soluciones para incorporar un fusible mecánico, embrague mecánico, embrague electromagnético o acoplamiento de accionamiento magnético para proteger a los elementos de transmisión de una máquina contra una rotura grave porque el eje conductor puede seguir girando cuando se produce el bloqueo del eje conducido.

### 3 Desarrollo del gemelo digital de un fusible mecánico

En este caso se aborda el diseño un fusible mecánico de rotura por cizalladura, para evitar un esfuerzo excesivo en el accionamiento mecánico y proteger a los elementos de transmisión de una máquina contra una rotura grave.

El fusible mecánico consiste en la utilización de varios pernos con una corona debilitada por una entalla que se calcula para romperse al ser superada una determinada fuerza debida al bloqueo del eje conducido.

La parte superior del perno consta de una cabeza hexagonal, conforme a la norma UNE-EN 24018, sobre la cual aparece una corona con la forma de una proyección cilíndrica, de inferior diámetro que el de la cabeza hexagonal. Se incorpora una entalla en la zona de la unión entre la cabeza del perno y la corona para reducir la resistencia mecánica de dicha unión con el expreso objetivo de diseño de producir la rotura de la unión al bloquearse el eje conducido.

En la práctica, la rotura de los fusibles empieza por el más débil (como dice el dicho, la cadena se rompe por el eslabón más débil) y, los demás le siguen en rápida sucesión porque la rotura de uno de ellos produce instantáneamente una tensión mecánica en los fusibles restantes que es superior a la original. Como es previsible, los fusibles se rompen en rápida sucesión (es el llamado efecto dominó o reacción en cadena).

En la fase de diseño de los fusibles mecánicos hay que tener en cuenta, factores adicionales, como:

- Al romperse la corona, se debe tener en cuenta que quede alojada en un espacio que no genere problemas adicionales.
- El sistema de protección global debe ser de fácil acceso para realizar las operaciones de mantenimiento cuando hay que reemplazar los fusibles mecánicos rotos.

La siguiente imagen muestra un fusible roto y otro sano.

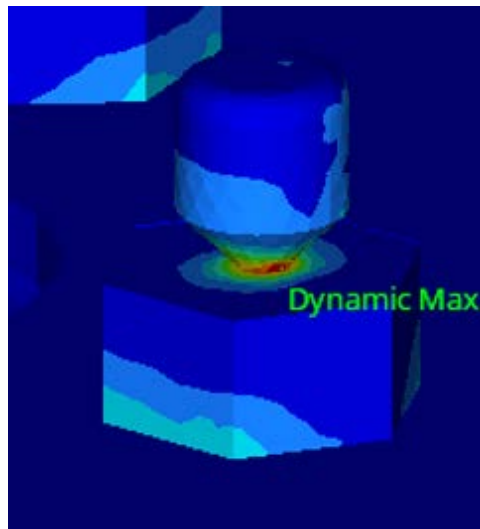


Ilustración 2. Fusible roto y fusible sano

El gemelo digital debe reproducir, en la medida de lo posible, el mecanismo completo en el que se va a alojar el fusible mecánico para poder reproducir mediante simulación las condiciones de funcionamiento normal y las condiciones de bloqueo. El gemelo digital debe permitir cambiar los parámetros críticos de diseño (en este caso las secciones de entalla) para simular el funcionamiento de diferentes configuraciones y obtener el nivel de tensiones mecánicas.

Las pruebas con el gemelo digital permiten verificar si, en condiciones de funcionamiento normal, el nivel de tensiones en la zona de la entalla supera o no el límite elástico del material y que en el caso de bloqueo se producen tensiones mecánicas que están por encima de la resistencia mecánica del fusible, garantizando así su rotura ante el bloqueo del mecanismo objeto de análisis.

La forma cónica de la entalla concentra las tensiones mecánicas de la transmisión (literalmente actúa como un embudo) en un espacio muy reducido, causando un aumento de la tensión que supera a la resistencia mecánica del fusible y causa su rotura al producirse el bloqueo del eje conducido. La siguiente imagen, tomada de la simulación por ordenador del bloqueo del eje conducido, muestra un primer plano del nivel de tensiones mecánicas responsable de la rotura del fusible.



**Ilustración 3. Detalle de la zona de máxima tensión obtenido del cálculo de las tensiones equivalentes de von Mises. Tómesese nota que dicho valor máximo ocurre en la parte más estrecha de la entalla, que es el lugar donde se rompe el fusible**



## 4 OTRAS REFERENCIAS DE INTERÉS

Si le interesa conseguir más información sobre el uso de gemelos digitales para el desarrollo de productos con técnicas de simulación, o sobre los fusibles mecánicos, le invitamos a explorar las siguientes referencias:

[https://altair.com/docs/default-source/pdfs/altair\\_dt-global-survey-report\\_web.pdf?\\_hstc=32427745.a016cd9afef72e3be1ad6b7e1fdbbf1c.1682579399025.1682579399025.1682579399025.1&\\_hssc=32427745.2.1682579399026&\\_hsfp=4024977384&\\_ga=2.233334430.188166074.1682579398-1156881506.1682579398&\\_gac=1.127135231.1682579441.CjwKCAjwuqiiBhBtEiwATgvixEji4RM2rPtfexRybew5rscdl58gNDeBmxmkis1\\_RlgsNTqQyUZalRoCnngQAvD\\_BwE](https://altair.com/docs/default-source/pdfs/altair_dt-global-survey-report_web.pdf?_hstc=32427745.a016cd9afef72e3be1ad6b7e1fdbbf1c.1682579399025.1682579399025.1682579399025.1&_hssc=32427745.2.1682579399026&_hsfp=4024977384&_ga=2.233334430.188166074.1682579398-1156881506.1682579398&_gac=1.127135231.1682579441.CjwKCAjwuqiiBhBtEiwATgvixEji4RM2rPtfexRybew5rscdl58gNDeBmxmkis1_RlgsNTqQyUZalRoCnngQAvD_BwE)  
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A3437&LanguageCode=es&DocumentPartId=&Action=Launch>  
<https://www.scribd.com/document/424314187/ANALISIS-DE-TENSION-FUSIBLE-MECANICO-docx>  
<https://addi.ehu.es/handle/10810/36585>  
<https://www.lacomunidadeltaller.es/posible-rotura-del-fusible-mecanico-en-el-embrague-del-compresor/>  
<https://www.youtube.com/watch?v=6fDXUz1dhkQ>  
[https://www.eaclima.es/tienda/Plato-de-embrague-con-fusible-mecanico-para-compresor-denso-Recambios-para-compresor-22W0052\\_8706637-1-0\\_gp](https://www.eaclima.es/tienda/Plato-de-embrague-con-fusible-mecanico-para-compresor-denso-Recambios-para-compresor-22W0052_8706637-1-0_gp)  
[https://www.youtube.com/watch?v=rd1U\\_Y9sIY4](https://www.youtube.com/watch?v=rd1U_Y9sIY4)  
[https://www.youtube.com/watch?v=zZgaZWUj\\_4U](https://www.youtube.com/watch?v=zZgaZWUj_4U)  
[https://www.tiktok.com/@talleres\\_piba/video/7031833664375852293](https://www.tiktok.com/@talleres_piba/video/7031833664375852293)  
<https://eide.net/producto/limitador-de-par-mecanico-irreversible-lpu/>  
<https://eide.net/producto/limitador-de-par-mecanico-lpc/>  
<https://eide.net/producto/limitador-de-par-de-bolas-lpb/>  
<https://eide.net/producto/limitador-de-par-lpss/>  
<https://www.collvilaro.com/catalogos/NIL-UNION.pdf>  
<http://luisjdevniak.com.ar/producto/pinza-de-suspension-con-fusible-mecanico-incorporado/>

Las Oficinas Acelera pyme puestas en marcha en toda España por Red.es, entidad pública adscrita al Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital a través de la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial, cuentan con un presupuesto global de 8 millones de euros, de los cuales Red.es aportará 6,3 y las entidades beneficiarias el resto. Las actuaciones están cofinanciadas con fondos FEDER de la Unión Europea, en el marco del Programa Operativo Plurirregional de España FEDER 2014-2020 (POPE) bajo el lema “Una manera de hacer Europa”.

Contacto operativo en la Oficina Acelera pyme

*Roberto Mateu Ortiz* - [rmateu@femeval.es](mailto:rmateu@femeval.es) // (+34) 963719761