

*DESARROLLO DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS  
TERMO-MECÁNICO ANTE ESCENARIOS AOO Y DEC-A  
EN REACTORES NUCLEARES DE CENTRALES LWR CON  
COMBUSTIBLE ATF (METATF)*

*NFOQUE ADVISORY SERVICES (NFQ): J. Sánchez, J. Arrabal, A. Soler*

*Coordinador en el CSN: Miguel Sánchez Perea*

Jornadas de I+D+i del Consejo de Seguridad Nuclear  
Junio 2026



## 1 Introducción

## 2 Metodología

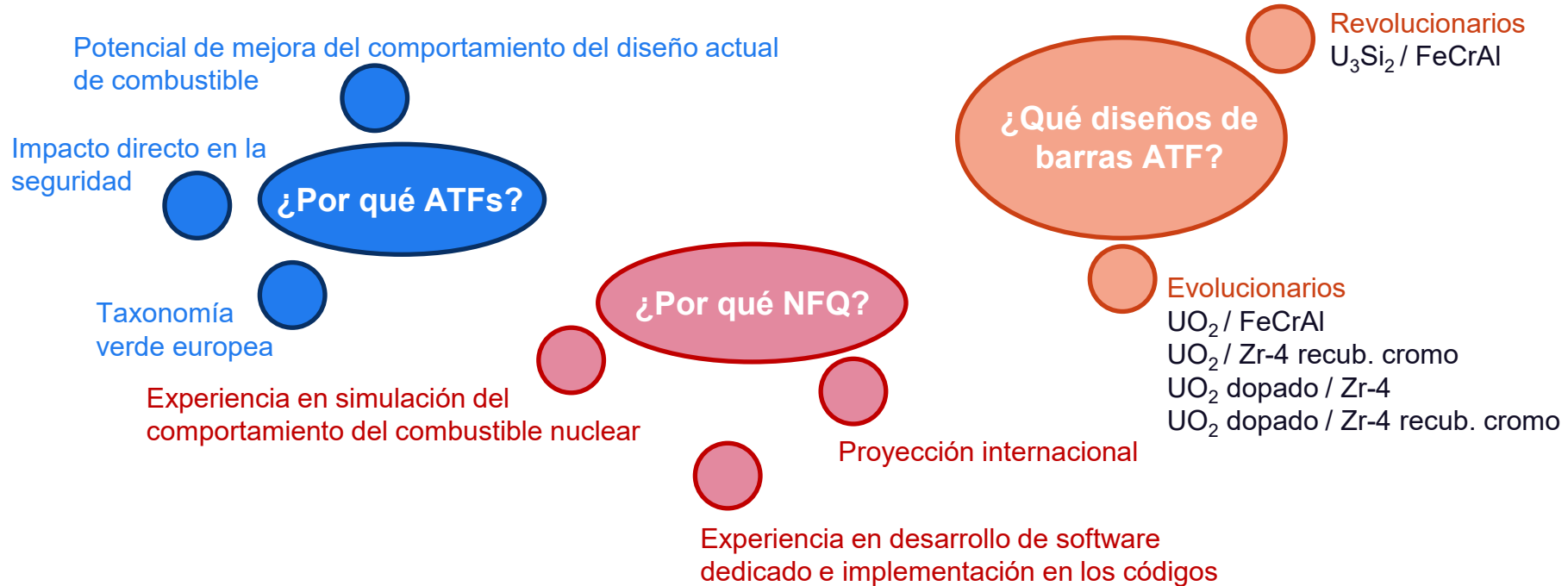
## 3 Simulaciones y resultados

## 4 Conclusión

# Introducción

1

## Proyecto METATF (CSN-NFQ)



# Metodología

2



Las tareas identificadas en el proyecto se clasifican según:

## Área 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE

Identificar el punto de partida.

Justificar toma de decisiones dentro del proyecto.

## Área 2: DESARROLLO DE CORRELACIONES E IMPLEMENTACIÓN EN LOS CÓDIGOS.

Desarrollo de versiones in-house de los códigos para realizar los análisis.

FeCrAl | Cr-coated Zry - TRACE

Combustible dopado - TRANSURANUS

## Área 3: DESARROLLO Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS SELECCIONADOS.

Desarrollo y aplicación de una metodología a nivel de núcleo

Periodo de irradiación - TRANSURANUS

Secuencias: LBLOCA y SBO - TRACE | TRANSURANUS

Técnicas de simulación avanzadas: BEPU - TRANSURANUS

## Área 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE

## Área 2: DESARROLLO DE CORRELACIONES E IMPLEMENTACIÓN EN LOS CÓDIGOS.

### UO2 dopado con cromo

- **Mayor tamaño de grano**
  - 50  $\mu\text{m}$
- **Mayor densidad del combustible**
  - 97.10 % de TD
- **No** se considera **densificación** inicial de las pastillas.
- **Fluencia mecánica** de las pastillas de combustible.
  - **Modificación de TRU** (Nuevo desarrollo)
- **Mayor difusividad** de los gases en la matriz de combustible.
  - **Modificación de TRU**

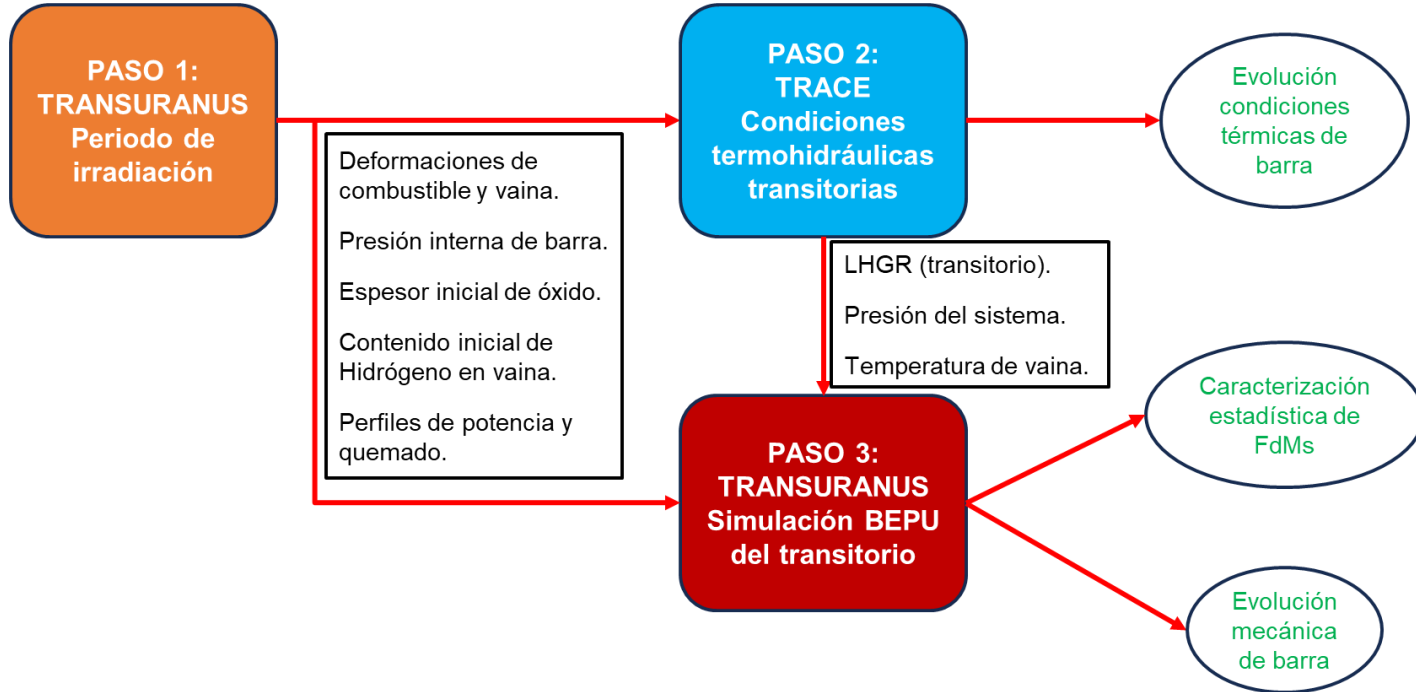
### Zry recubierto con cromo

- **Comportamiento mecánico muy similar** a la **vaina convencional** de Zry (Hipótesis conservadora)
- **Espesor del recubrimiento**
  - 15  $\mu\text{m}$
- **Correlaciones de oxidación**
  - **Modificación de TRACE**
  - **Disponible en TRU**
- **Criterio de pinchazo específico**
  - **Disponible en TRU**

### FeCrAl

- **Espesor de vaina**
  - **Convencional** 570  $\mu\text{m}$
  - **Reducido** 385  $\mu\text{m}$
- **Propiedades físicas del material**
  - **Modificación de TRACE**
- **Correlaciones de oxidación**
  - **Modificación de TRACE**
- **Modelo de deformación plástica**
  - **Modificación de TRACE**
- **Criterio de pinchazo específico**
  - **Modificación de TRACE**

## Área 3: DESARROLLO Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS SELECCIONADOS.





## Área 3: DESARROLLO Y SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS SELECCIONADOS.

### Hipótesis para la simulación de los transitorios de LOCA y SBO

LOCA	<ul style="list-style-type: none"><li>• LBLOCA + LOOP</li><li>• Un único tren SI.</li><li>• El calor de residual se incrementa un 20% con respecto al valor nominal.</li><li>• Coeficiente de reactividad de huecos = 0</li><li>• No se simula la descarga del ACC del lazo de la rotura.</li></ul>
SBO	<ul style="list-style-type: none"><li>• PPE + Fallo al arranque de los generadores diésel.</li><li>• AFW indisponible hasta recuperación de la corriente.</li><li>• Hipótesis de fallo de los sellos pasivos de las RCPs al alcanzar 300 °C.</li><li>• Caudal de descarga por el LOCA de sellos limitado a 11.48 kg/s.</li><li>• La recuperación de la AC implica la capacidad de inyectar con los sistemas de emergencia.</li></ul>

#### CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

PCT CONVENCIONAL:  $T_{\text{clad}} < 1477 \text{ K}$

PCT ATF: FeCrAl:  $T_{\text{clad}} < 1773 \text{ K}$  | Zry-cromo:  $T_{\text{clad}} < 1605.5 \text{ K}$

# Simulaciones y resultados

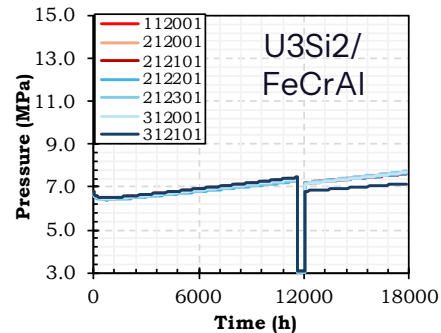
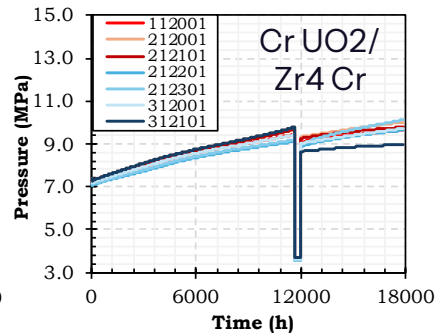
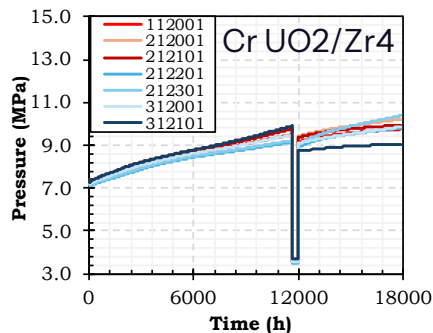
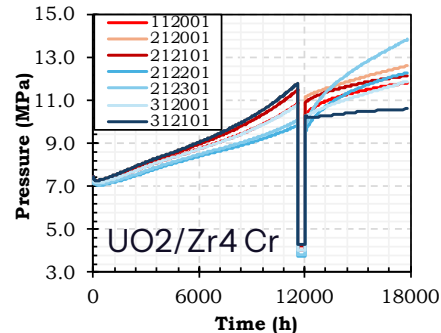
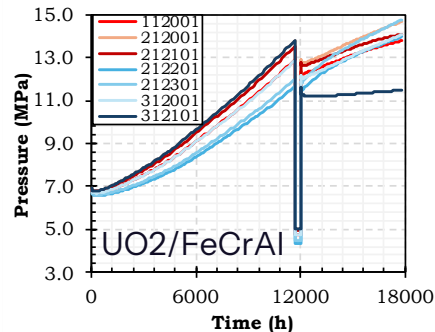
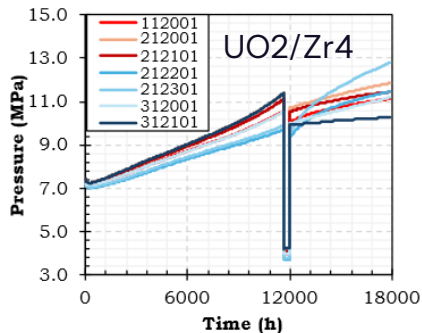
3



## Paso 1: Simulación del periodo de operación

Barras calientes de  
segundo ciclo

Presión Interna

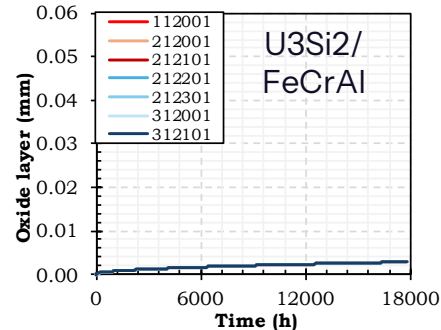
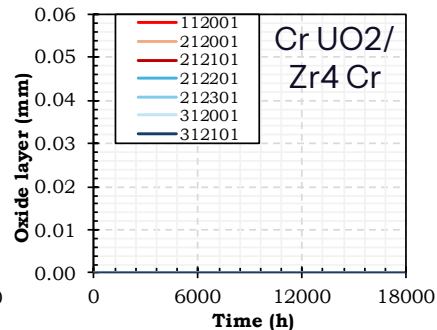
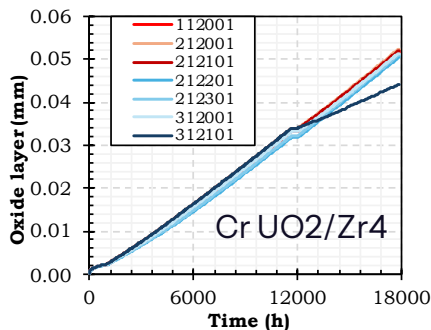
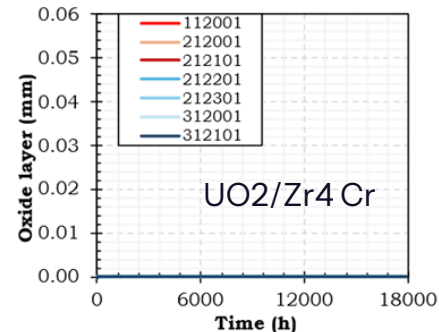
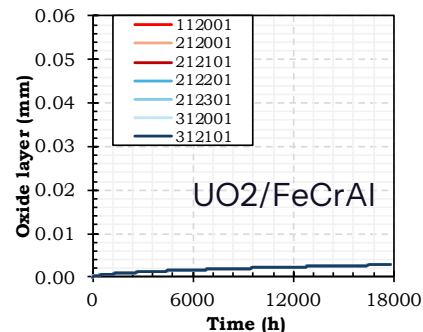
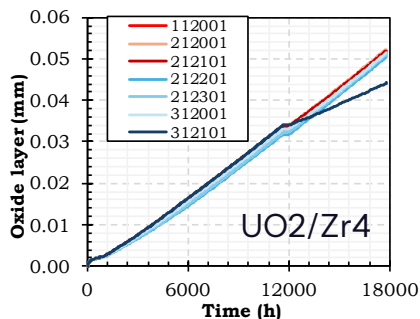




## Paso 1: Simulación del periodo de operación

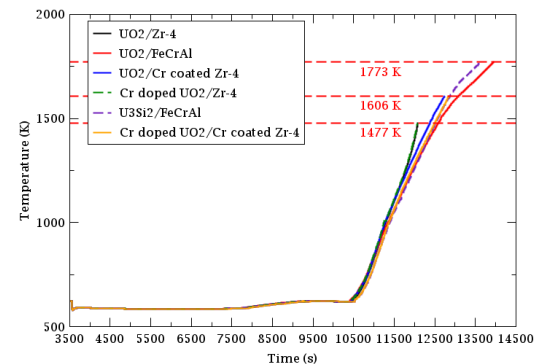
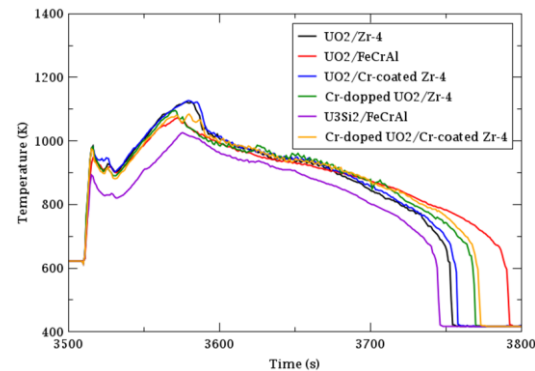
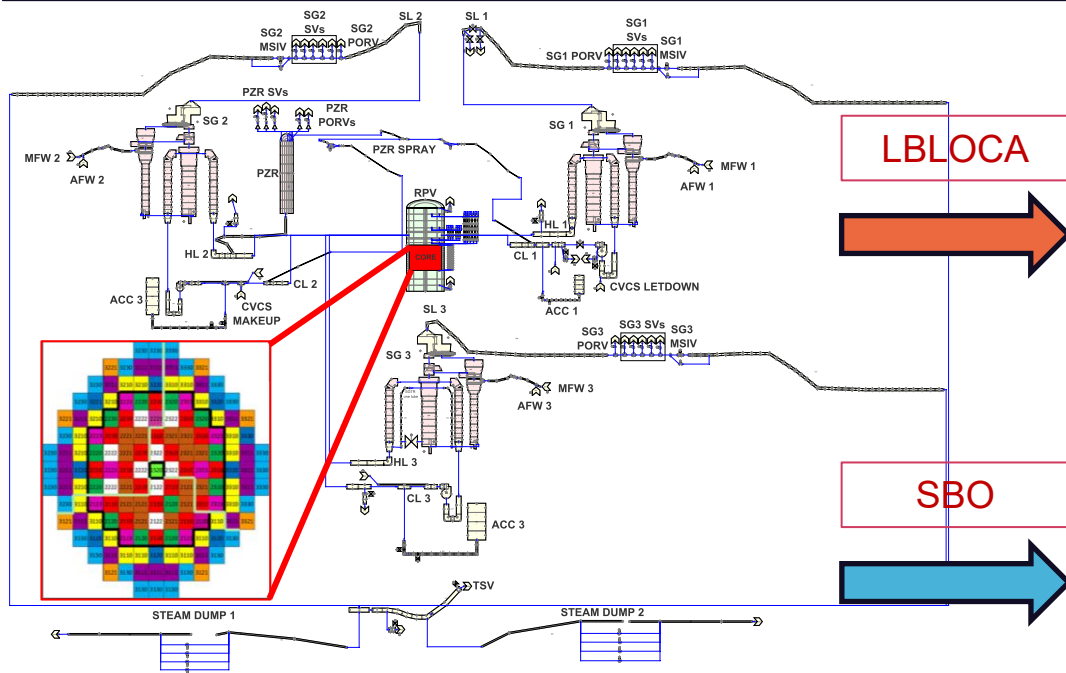
Barras calientes de  
segundo ciclo

Espesor de Oxidación





## Paso 2 - TRACE: Cálculo de las condiciones de contorno termohidráulicas

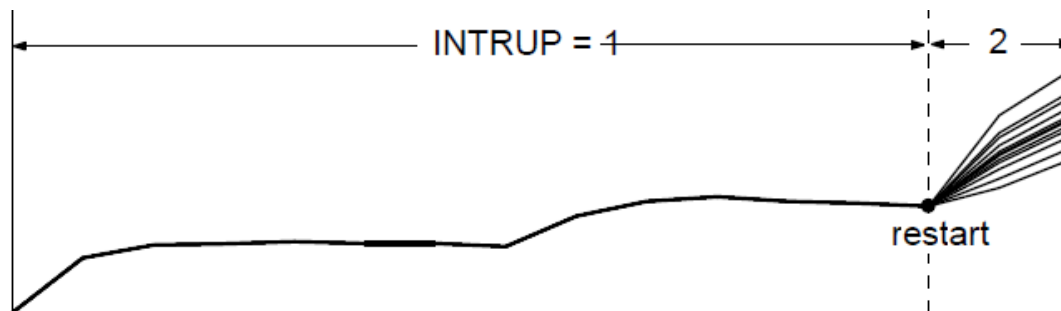




## Paso 3 – TU: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

### LBLOCA – TU (BEPU)

- Continuación de la simulación del periodo de operación.
- 66 análisis BEPU por cada material
- Muestreo por Monte Carlo de 200 casos para cada barra
- 18 parámetros inciertos



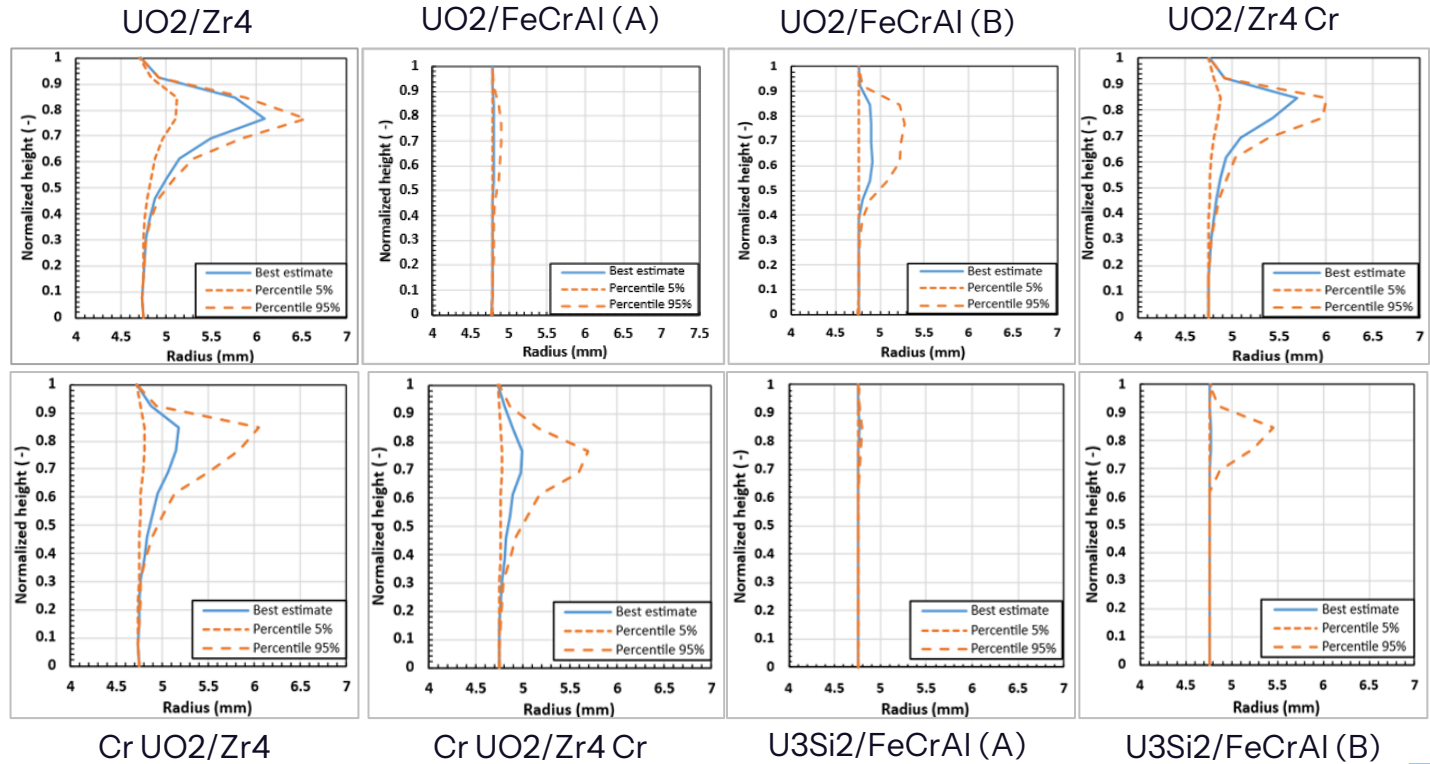
105600 simulaciones realizadas



## Paso 3 – TU: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

LBLOCA – TU  
(BEPU)

Deformación máxima de vaina  
(Análisis del canal caliente)





## Paso 3 – TU: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

LBLOCA – TU (BEPU)

Tiempo y probabilidad de pinchazo (Análisis del canal caliente)

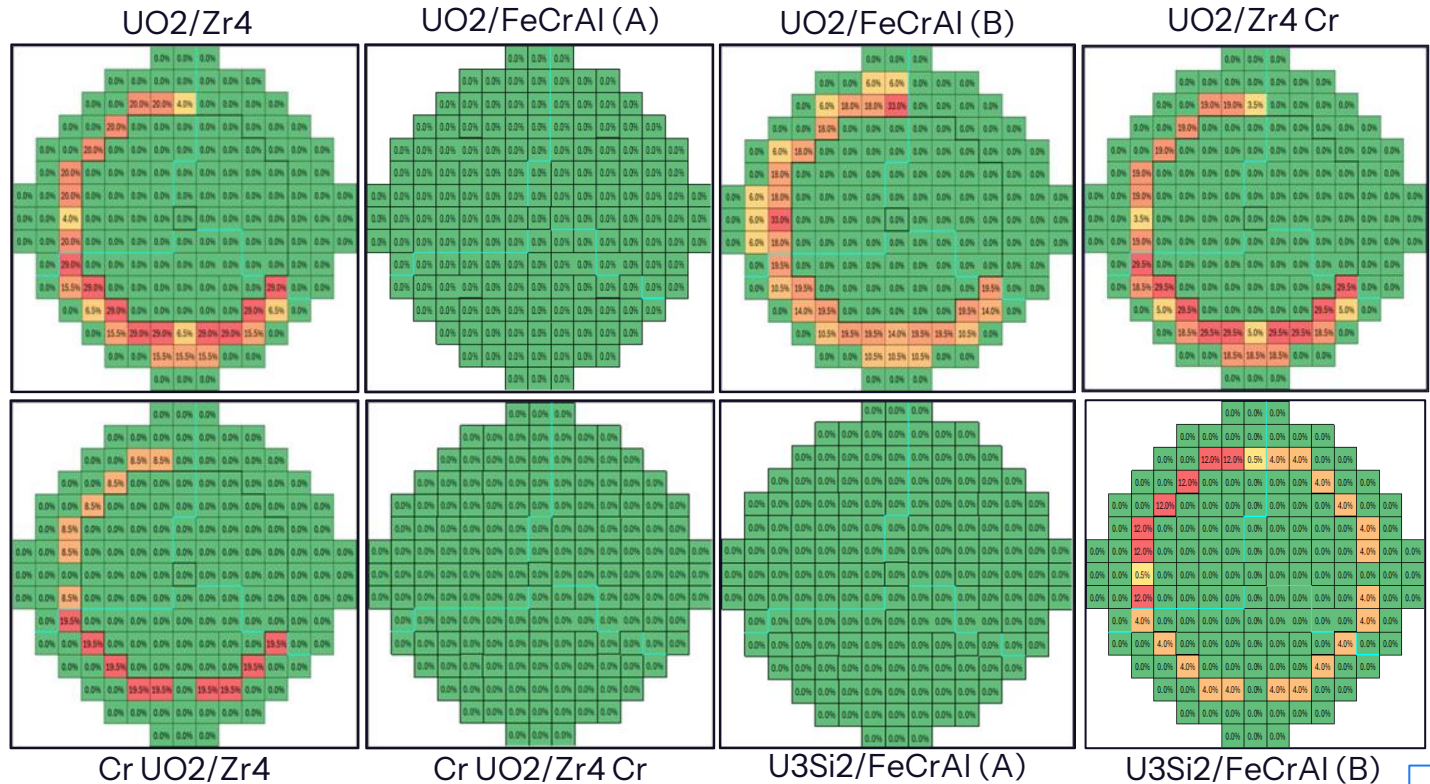
<b>Materiales de las barras combustibles</b>	<b>Tiempo de pinchazo (s)</b>	<b>Percentil 5</b>	<b>Percentil 95</b>	<b>Número de casos con pinchazo (-)</b>	<b>Probabilidad de pinchazo (-)</b>
UO <sub>2</sub> /Zr-4	57.9	51.3	66.8	70	35.0
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (A)	55.9	52.8	57.7	29	14.5
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (B)	42.0	31.2	57.2	163	81.5
UO <sub>2</sub> / Zr-4 recub. de cromo	55.6	49.1	68.8	68	34.0
UO <sub>2</sub> dopado/Zr-4	58.5	56.9	61.4	25	12.5
UO <sub>2</sub> dopado/Zr-4 recub. de cromo	-	-	-	0	0.0
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (A)	-	-	-	0	0.0
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (B)	64.2	63.5	65.1	8	4.0



## Paso 3 – TU: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

LBLOCA – TU  
(BEPU)

Probabilidad de pinchazo  
Distribución radial en el núcleo  
(Barras medias)

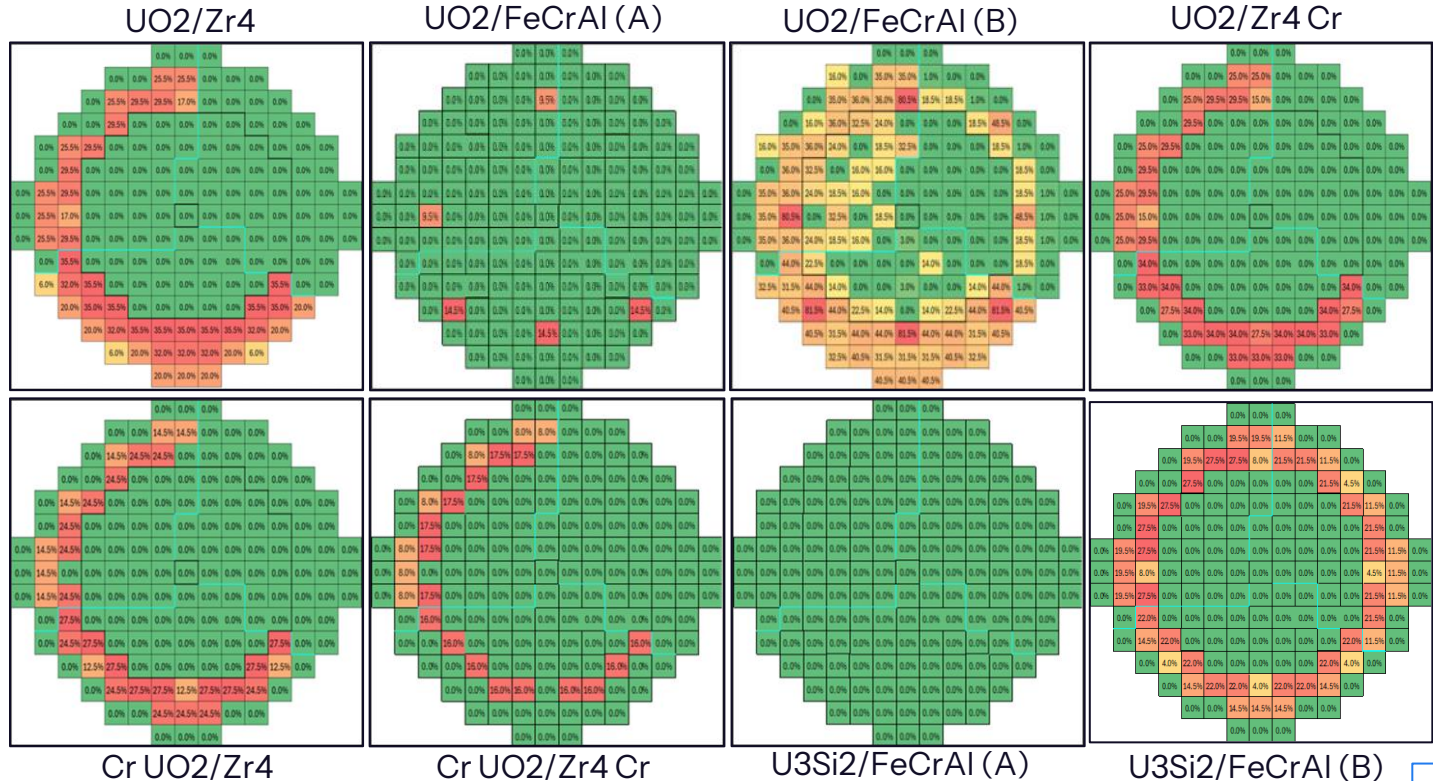




## Paso 3 – TU: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

LBLOCA – TU  
(BEPU)

Probabilidad de pinchazo  
Distribución radial en el núcleo  
(Barras calientes)



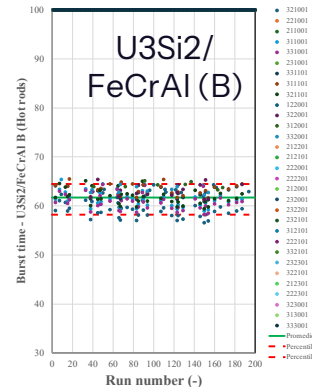
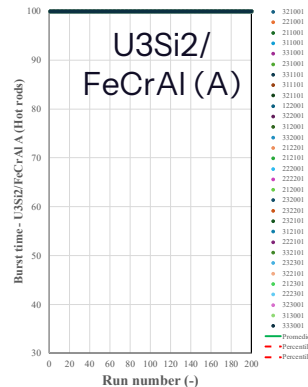
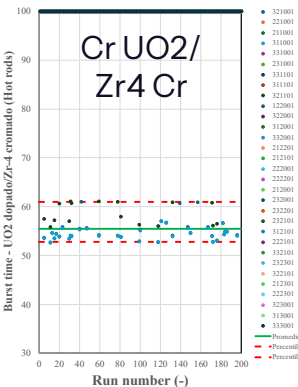
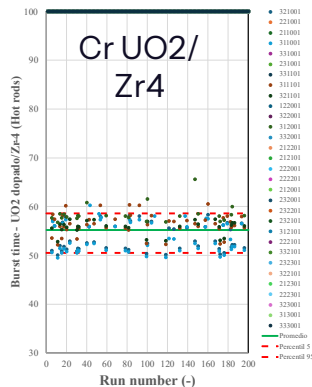
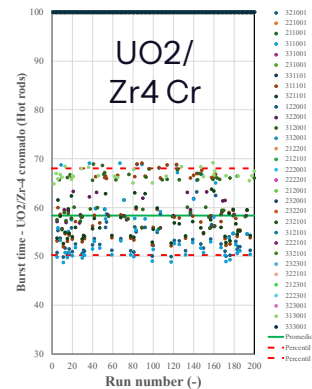
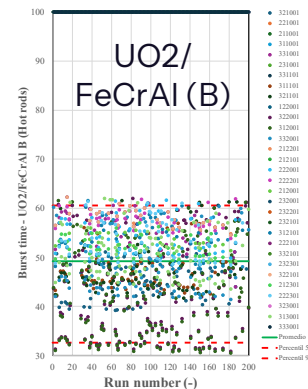
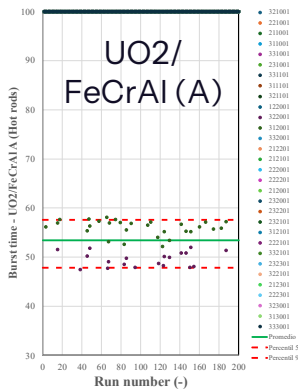
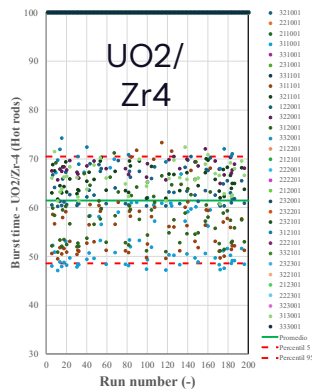




## Paso 3: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

LBLOCA - TU  
(BEPU)

Tiempo de pinchazo  
(Barras calientes)





## Paso 3: Simulación del comportamiento de las barras combustibles

**LBLOCA – TU  
(BEPU)**

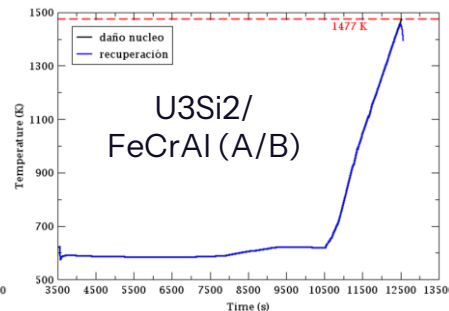
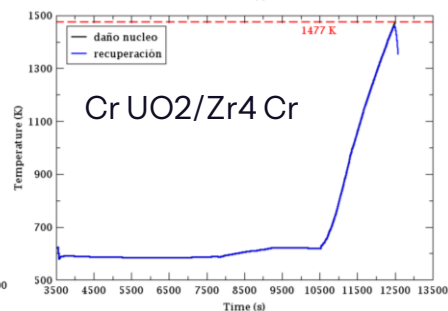
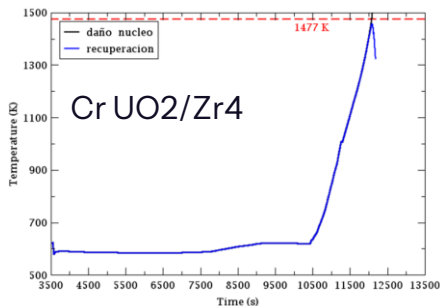
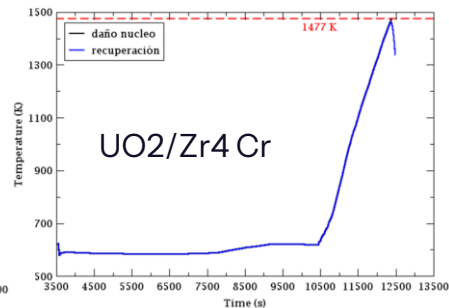
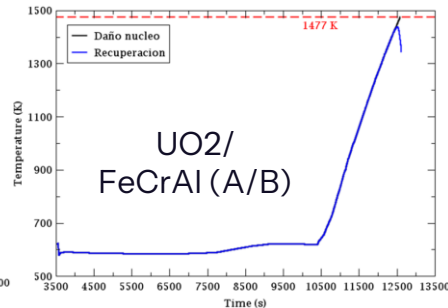
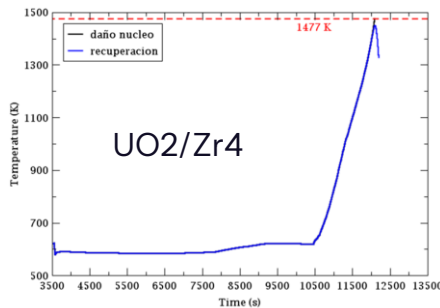
Materiales de las barras combustibles	Barras medias			Barras calientes		
	Tiempo promedio de pinchazo (s)	Percentil 5	Percentil 95	Tiempo promedio de pinchazo (s)	Percentil 5	Percentil 95
UO <sub>2</sub> /Zr-4	63.29	51.69	72.04	61.43	48.55	70.46
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (A)	-	-	-	53.41	47.86	57.63
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (B)	47.35	36.12	60.01	49.18	32.67	60.57
UO <sub>2</sub> / Zr-4 recub. de cromo	62.31	55.99	68.45	58.34	50.29	68.05
UO <sub>2</sub> dopado/Zr-4	57.12	55.31	58.50	55.22	50.54	58.58
UO <sub>2</sub> dopado/Zr-4 recub. de cromo	-	-	-	55.49	52.83	60.95
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (A)	-	-	-	-	-	-
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (B)	63.72	61.84	65.33	61.72	58.25	64.50



## Paso 2-TRACE: Cálculo de los tiempos de disponibles

SBO DEC-A

Material	t rec (min)	$\Delta t$ (min)
UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub>	140.42	-
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (A/B)	147.50	7.08
UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub> Cr	145.52	5.00
Cr UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub>	140.33	-0.09
Cr UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub> Cr	147.25	6.83
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (A/B)	147.17	6.75



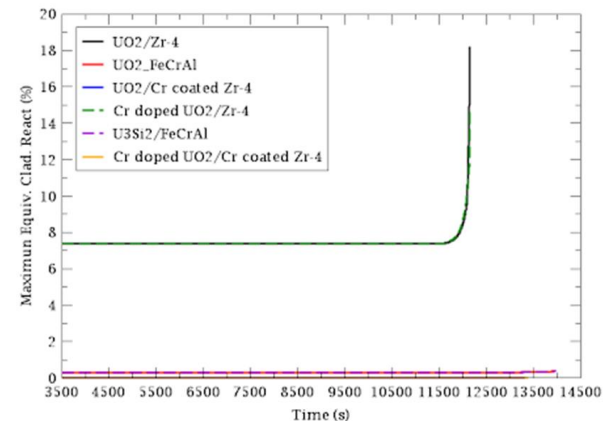
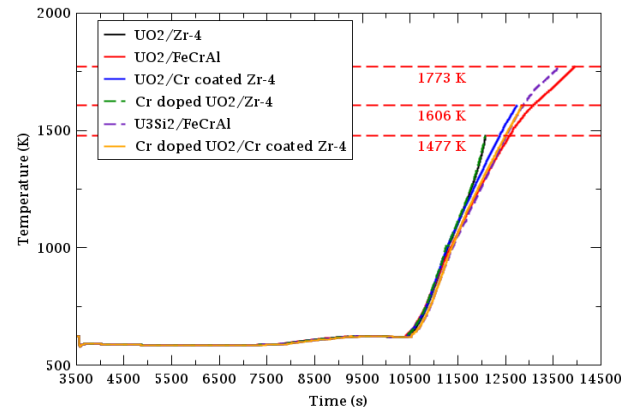
No se han obtenido pinchazos en las simulaciones con TRACE (verificado aplicando el paso 3 de la metodología con el código TU)



## Paso 2-TRACE: Cálculo de los tiempos de daño

SBO DEC-B

Material	Materiales		Materiales + CAs	
	t daño (min)	$\Delta t$ (min)	t daño (min)	$\Delta t$ (min)
UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub>	142.28	-	142.28	-
UO <sub>2</sub> /FeCrAl (A/B)	150.57	8.29	173.46	31.18
UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub> Cr	147.19	4.91	153.17	10.88
Cr UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub>	142.05	-0.23	142.05	-0.23
Cr UO <sub>2</sub> /Zr <sub>4</sub> Cr	149.13	6.84	154.95	12.67
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> /FeCrAl (A/B)	149.06	7.27	168.43	26.15



Conclusiones

4



- Se ha analizado con éxito el comportamiento de materiales ATF en secuencias de LOCA y SBO mediante una metodología avanzada basada en la combinación de TRACE y TU. Los resultados obtenidos a nivel de cada material son los esperados.
- Se han creado unas versiones propias de TRACE y TU para extender sus capacidades de simulación de los materiales FeCrAl y Zr-4 con recubrimiento de cromo, y UO<sub>2</sub> dopado, respectivamente.
- En el caso del LBLOCA, se ha demostrado que se consigue una reducción importante del número de barras falladas (y de su probabilidad de fallo) debido a la presencia de los materiales ATF, especialmente, cuando se combinan combustible y vaina.
- Para el SBO, los resultados muestran que la extensión del tiempo disponible para la recuperación de la corriente eléctrica es limitada si no se considera la extensión de los criterios de aceptación.
- Además, en el caso del SBO se propone analizar el caso considerando la posibilidad del fallo de la rama caliente por fluencia mecánica aplicando, para ello, los tres pasos de la metodología propuesta.



1. E. Castro, 2022. '*Implementation of a creep correlation for Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped fuels in TRANSURANUS*'. International TRANSURANUS workshop, Bologna, Italy.
2. E. Castro, A. Soler, J. Pérez Fresno, J. Sánchez Torrijos, C. Queral, 2023. '*Comparison of Zr-4 and FeCrAl claddings under LOCA conditions (IFA 650.10) using TRANSURANUS*'. 48<sup>th</sup> Annual Meeting of the Spanish Nuclear Society, Toledo, Spain
3. A. Soler, 2023. 'Incorporation of FeCrAl models and properties in TRACE code'. CAMP Spring Meeting. Budapest, Hungary
4. C. Queral, E. Redondo-Valero, D. Canal, E. Castro<sup>1</sup>, J. Sánchez-Torrijos, A. Soler, V. Sanchez-Espinoza, 2023. 'Transient Analysis in PWR, VVER, SMRs and Experimental Facilities'. Fall CAMP meeting. Washington, EEUU.
5. J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, 2024. '*SMRs y ATFs: Actividades desarrolladas por NFQ*'. Workshop ATF-CEIDEN, Madrid, Spain.
6. J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, 2024. '*IFA 650.10 test for Zr-4 and FeCrAl claddings*'. Workshop Towards nuclear fuel modelling in the various reactor types across Europe with TRANSURANUS, Torino, Italy.
7. J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, E. Castro, J. Perez-Fresno, 2024. 'Assessment of the potential benefits derived from the simulation of different evolutionary ATF materials under LOCA conditions (IFA 650.10)'. TopFuel2024 ENS Conference, Grenoble, France.



8. J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, E. Castro, C. Qeral, 2024. '*Simulation of the Halden IFA 650.10 LOCA test with TRACE and TRANSURANUS codes: Application to e-ATF materials*'. 50<sup>th</sup> Annual meeting of Spanish Nuclear Society, Cordoba, Spain.
9. J. Sanchez-Torrijos, Y. Martínez-Gonzalez, A. Soler, E. Castro, C. Qeral, 2024. '*Analysis of DEC-A sequences in a NuScale-like SMR considering ATF fuel performance using the system code TRACE*'. International Conference on Small Modular Reactors and their applications, IAEA headquarters, Vienna, Austria.
10. J. Arrabal de Haro, J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, E. Castro, C. Qeral, 2025. '*Analysis of the benefits obtained from the implementation of several ATF concepts under LBLOCA conditions in a generic PWR using TRACE and TRANSURANUS*'. International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), Bled, Slovenia.
11. J. Sánchez, J. Arrabal, A. Soler, C. Qeral, E. Castro, 2025. '*Development of a fuel safety evaluation methodology to compute the fuel rods probability of failure under transient conditions: Application to a LBLOCA in a PWR considering e-ATF materials*'. 51<sup>st</sup> Annual meeting of Spanish Nuclear Society, Caceres, Spain.
12. J. Arrabal de Haro, 2025. '*Análisis del comportamiento del combustible nuclear ATF mediante la combinación de TRACE y TRANURANUS en condiciones de LOCA*'. Master's Thesis.



Los autores de este trabajo expresan su agradecimiento por el soporte, tanto técnico como financiero, recibido por el CSN dentro del proyecto METATF.



Los autores de este trabajo dan las gracias a la plataforma CEIDEN por el apoyo recibido y por establecer el marco del proyecto METATF.



# ¡Gracias!

Datos de contacto:

[amparo.soler@nfq.es](mailto:amparo.soler@nfq.es)

[jorge.sanchez@nfq.es](mailto:jorge.sanchez@nfq.es)