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

Contenido

1 Introducción

2 Metodología

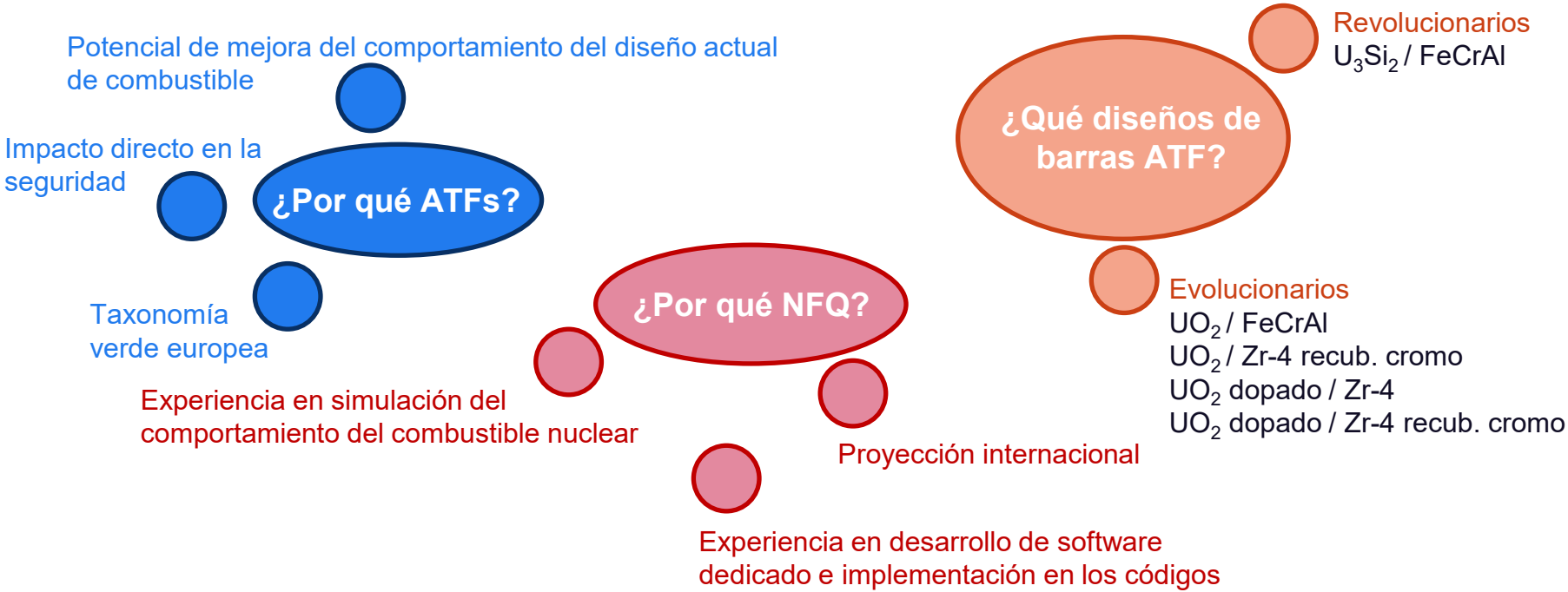
3 Simulaciones y resultados

4 Conclusión

Introducción

1

Proyecto METATF (CSN-NFQ)



Metodología

2

Metodología

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

Metodología

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 µm
- **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 TU (Nuevo desarrollo)
- **Mayor difusividad** de los gases en la matriz de combustible.
  - Modificación de TU

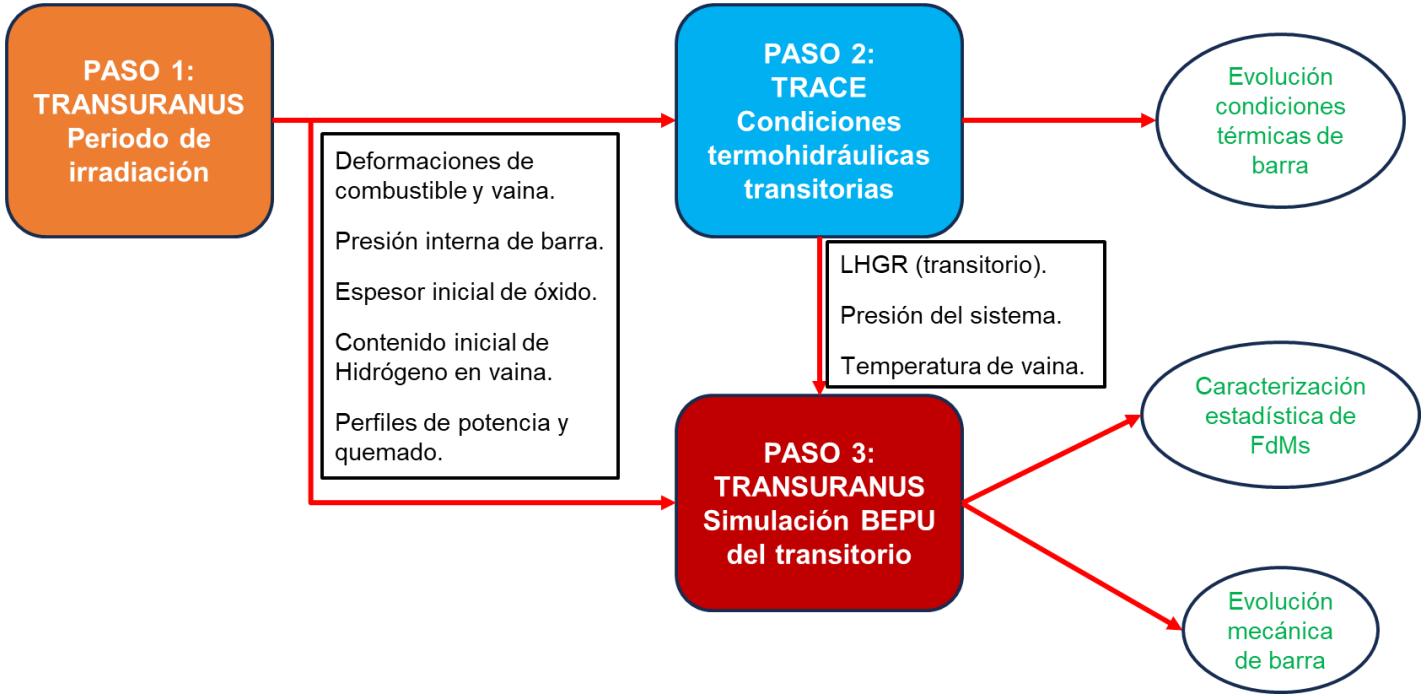
Zry recubierto con cromo

- **Comportamiento mecánico muy similar** a la **vaina convencional** de Zry (Hipótesis conservadora)
- **Espesor del recubrimiento**
  - 15 µm
- **Correlaciones de oxidación**
  - Modificación de TRACE
  - Disponible en TU
- **Criterio de pinchazo específico**
  - Disponible en TU

FeCrAl

- **Espesor de vaina**
  - Convencional 570 µm
  - Reducido 385 µm
- **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	• LBLOCA + LOOP • Un único tren SI. • El calor de residual se incrementa un 20% con respecto al valor nominal. • Coeficiente de reactividad de huecos = 0 • No se simula la descarga del ACC del lazo de la rotura.
SBO	• PPE + Fallo al arranque de los generadores diésel. • AFW indisponible hasta recuperación de la corriente. • Hipótesis de fallo de los sellos pasivos de las RCPs al alcanzar 300 °C. • Caudal de descarga por el LOCA de sellos limitado a 11.48 kg/s. • La recuperación de la AC implica la capacidad de inyectar con los sistemas de emergencia.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

PCT CONVENCIONAL: $T_{clad} < 1477$ K
PCT ATF: FeCrAl: $T_{clad} < 1773$ K | Zry-cromo: $T_{clad} < 1605.5$ K

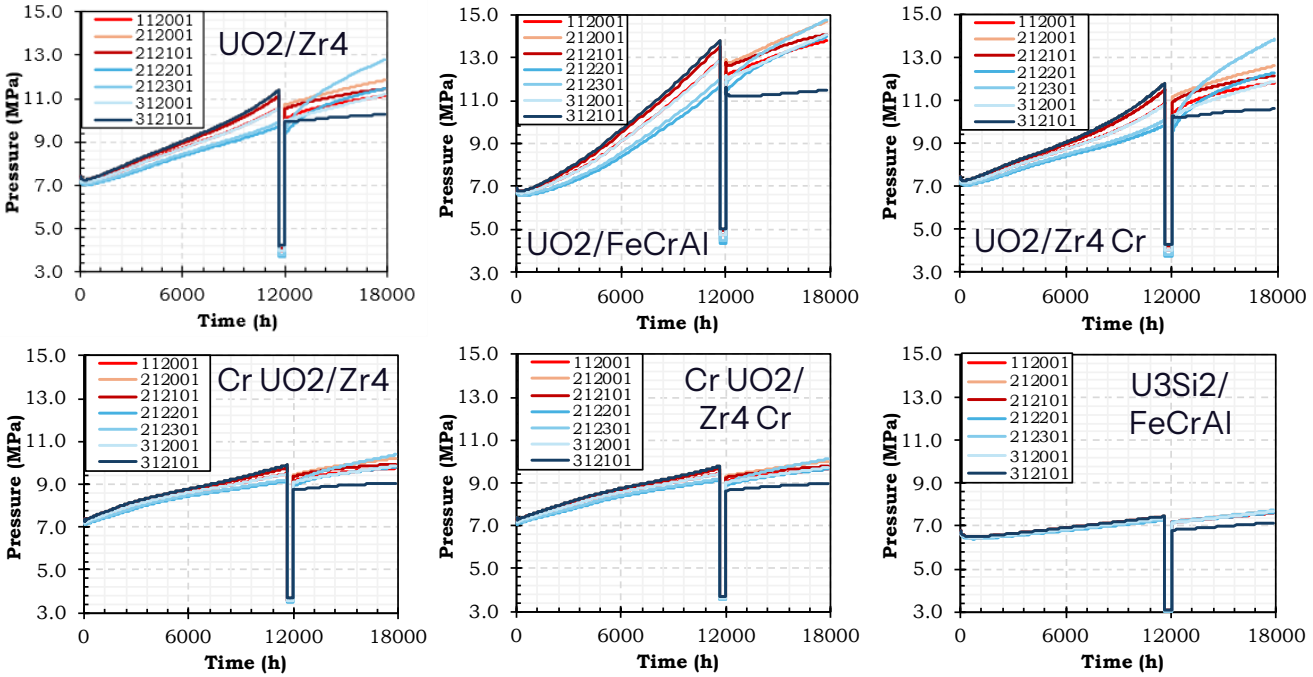
Simulaciones y resultados

3

Paso 1: Simulación del periodo de operación

Barras calientes de segundo ciclo

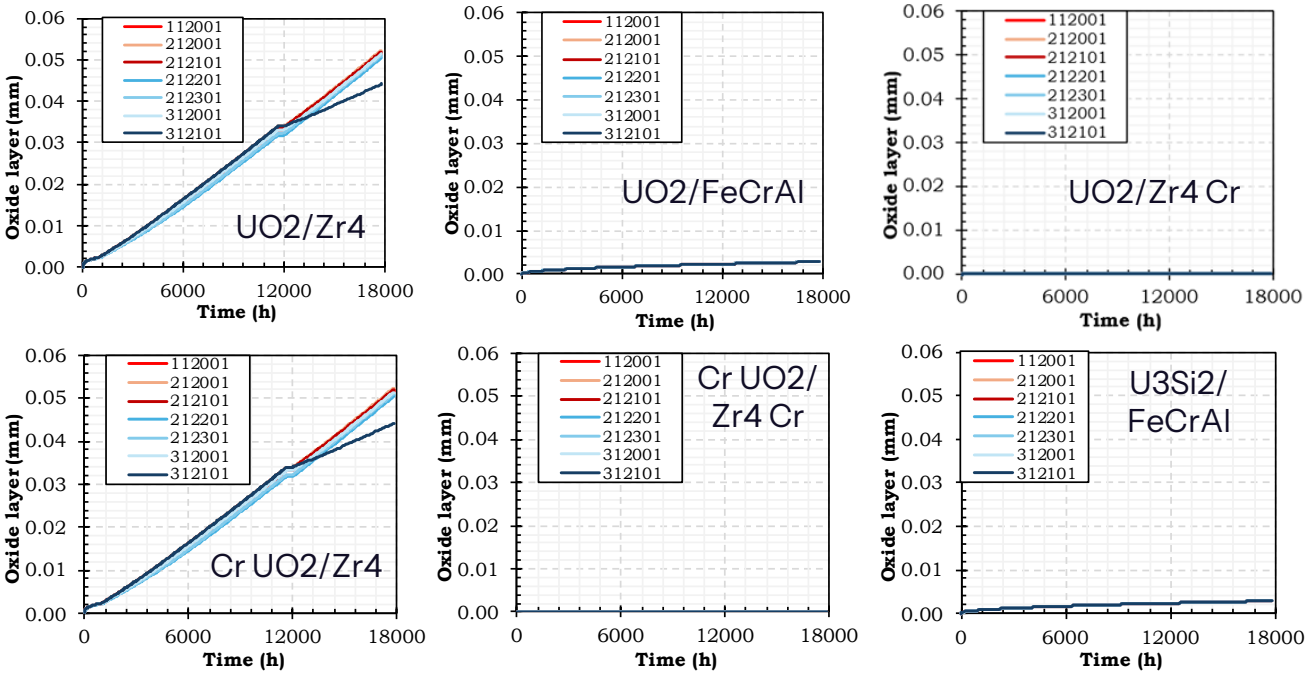
Presión Interna



Paso 1: Simulación del periodo de operación

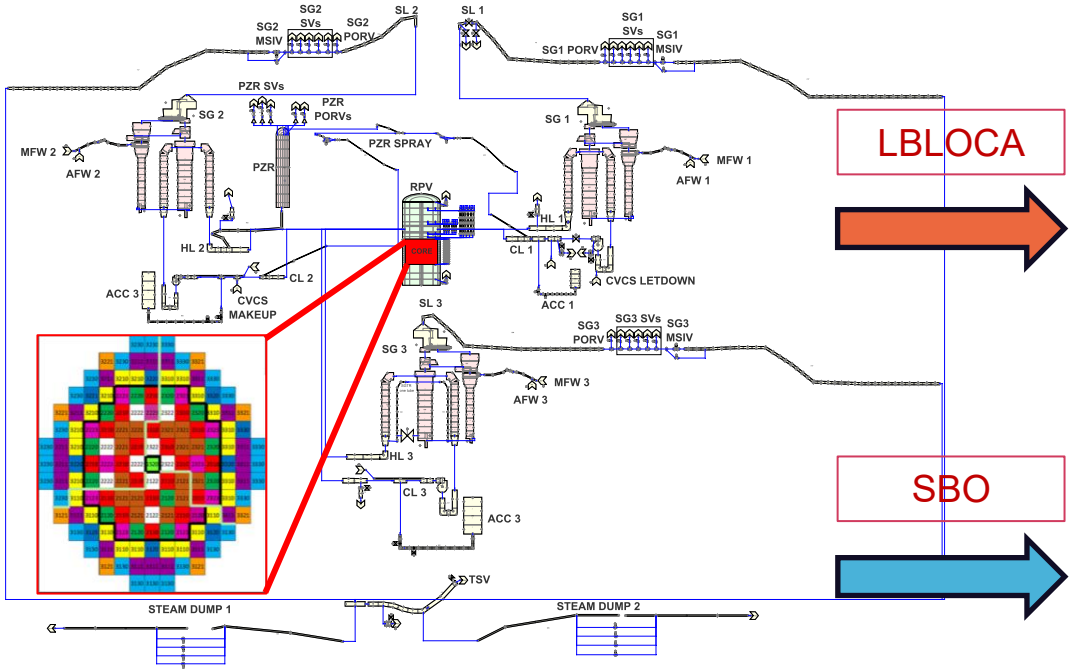
Barras calientes de segundo ciclo

Espesor de Oxidación



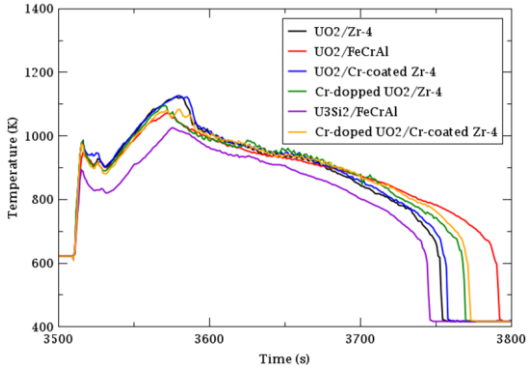
Simulaciones y resultados obtenidos

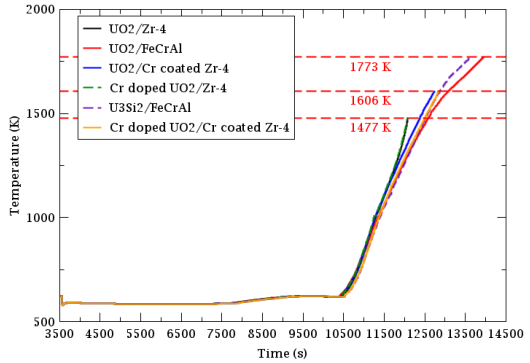
Paso 2 – TRACE: Cálculo de las condiciones de contorno termohidráulicas



LBLOCA

SBO



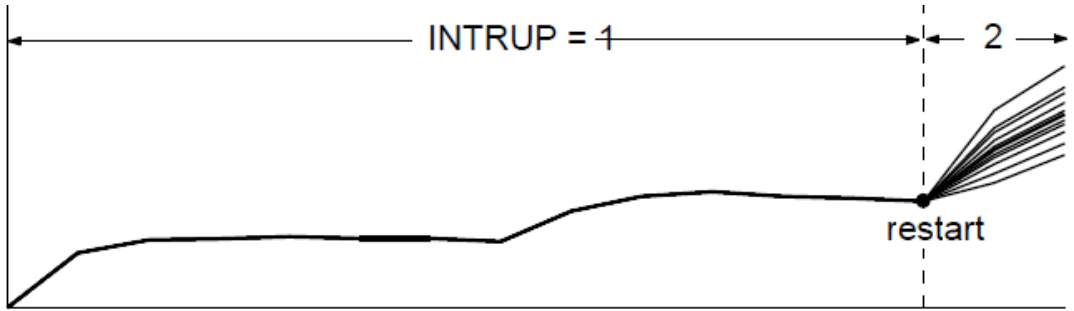


Simulaciones y resultados obtenidos

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

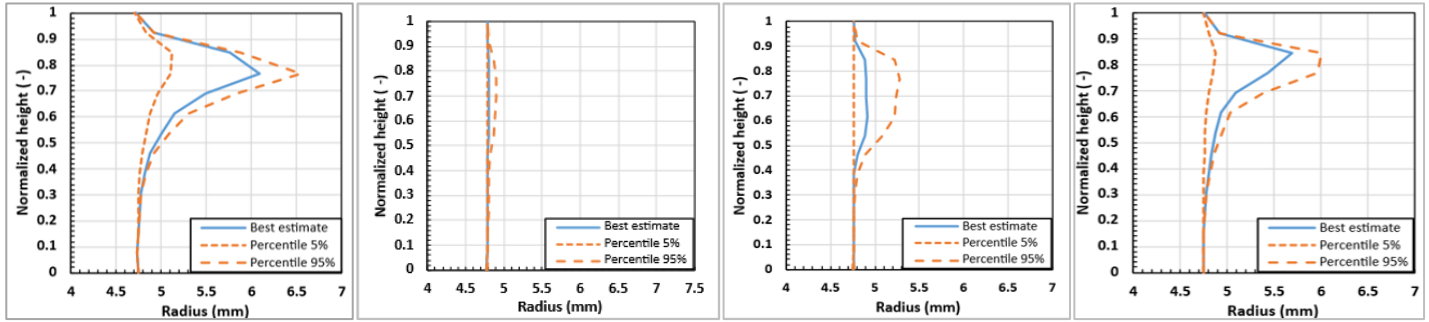
Simulaciones y resultados obtenidos

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

LBLOCA – TU (BEPU)

Deformación máxima de vaina (Análisis del canal caliente)

UO2/Zr4 | UO2/FeCrAl (A) | UO2/FeCrAl (B) | UO2/Zr4 Cr



Cr UO2/Zr4 | Cr UO2/Zr4 Cr | U3Si2/FeCrAl (A) | U3Si2/FeCrAl (B)

Simulaciones y resultados obtenidos

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

LBLOCA – TU (BEPU)

Tiempo y probabilidad de pinchazo (Análisis del canal caliente)

Materiales de las barras combustibles	Tiempo de pinchazo (s)	Percentil 5	Percentil 95	Número de casos con pinchazo (-)	Probabilidad de pinchazo (-)
UO2/Zr-4	57.9	51.3	66.8	70	35.0
UO_2/FeCrAl (A)	55.9	52.8	57.7	29	14.5
UO_2/FeCrAl (B)	42.0	31.2	57.2	163	81.5
UO_2/ Zr-4 recub. de cromo	55.6	49.1	68.8	68	34.0
UO_2 dopado/Zr-4	58.5	56.9	61.4	25	12.5
UO_2 dopado/Zr-4 recub. de cromo	-	-	-	0	0.0
U_3Si_2/FeCrAl (A)	-	-	-	0	0.0
U_3Si_2/FeCrAl (B)	64.2	63.5	65.1	8	4.0

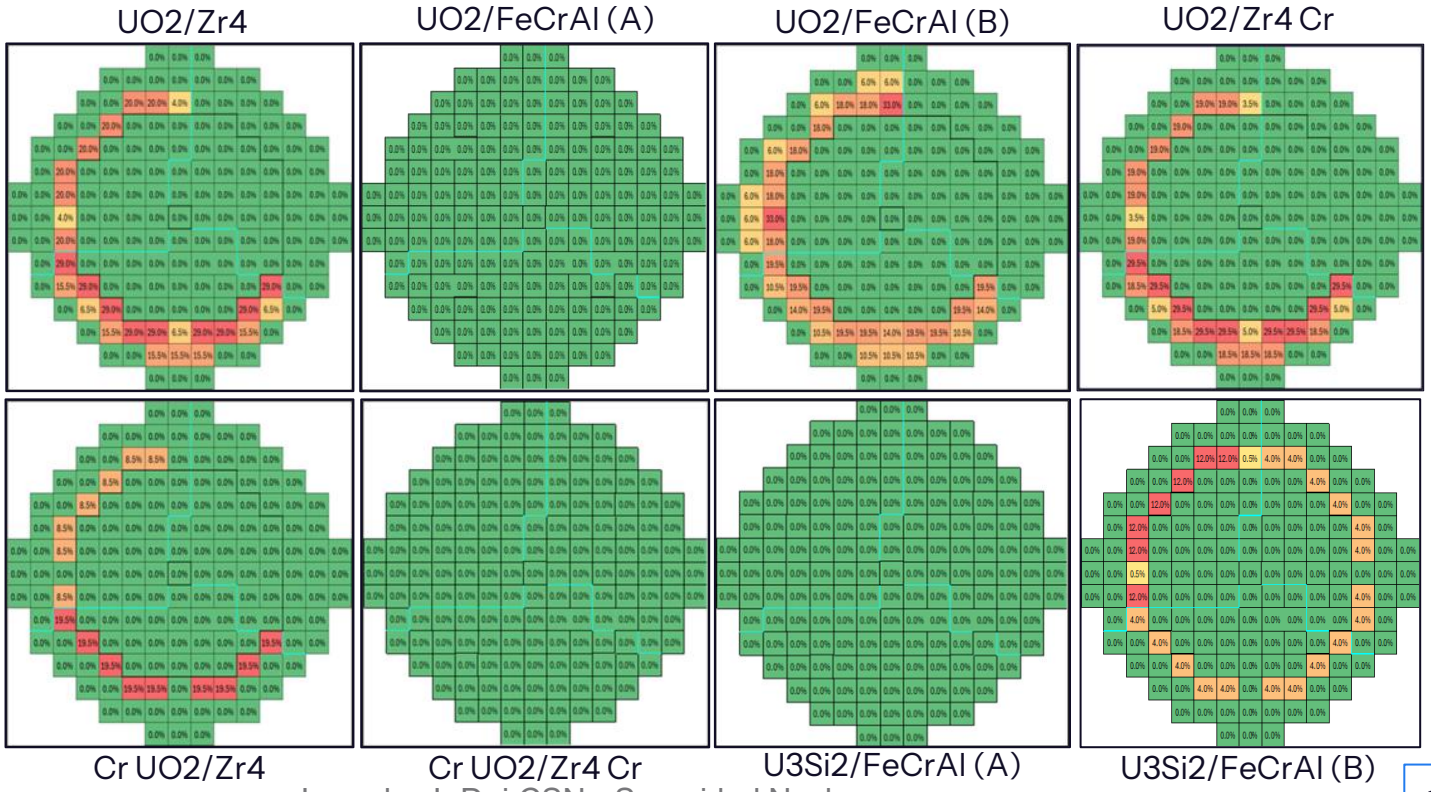
nfq BEYOND CONSULTING

Simulaciones y resultados obtenidos

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

LBLOCA – TU (BEPU)

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



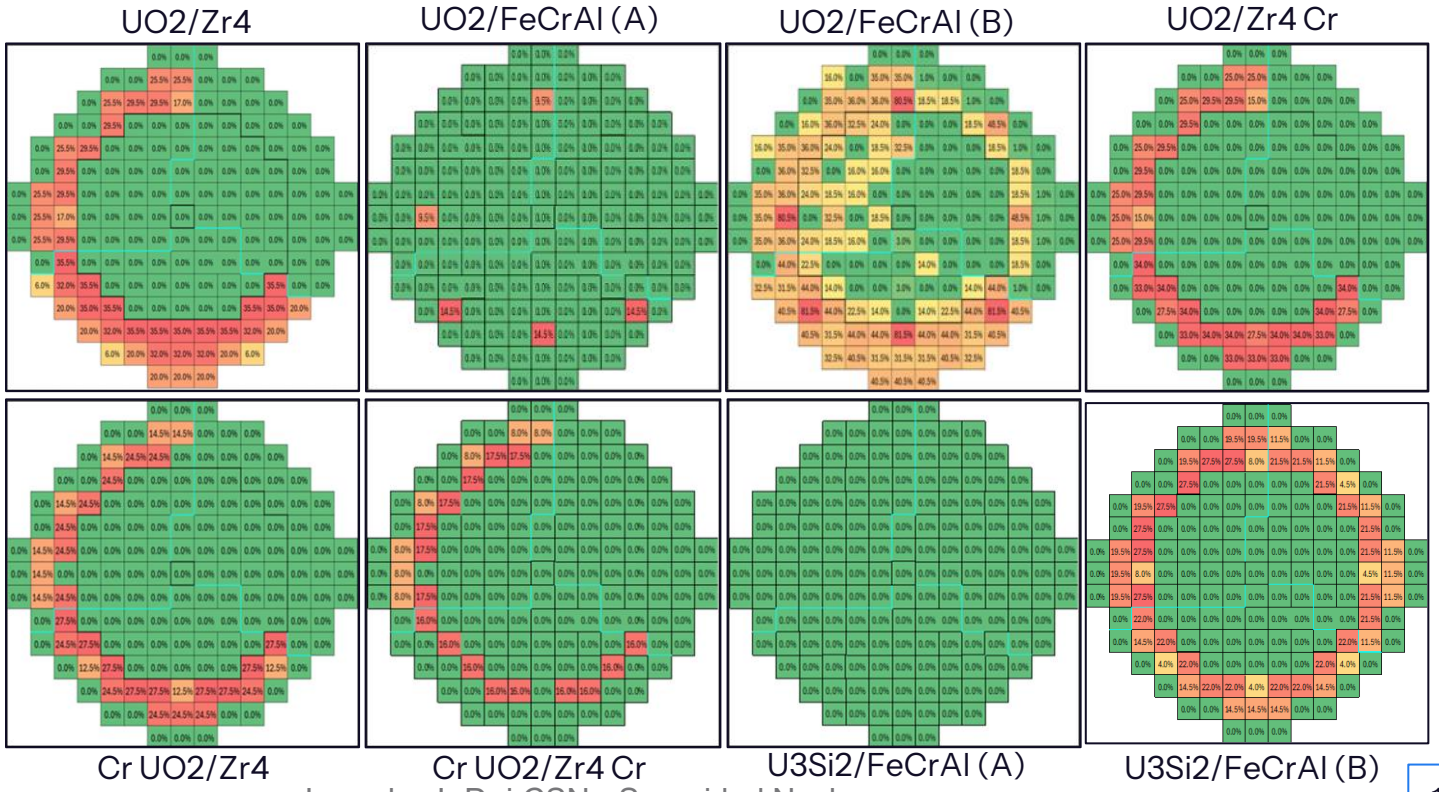
nfq BEYOND CONSULTING

Simulaciones y resultados obtenidos

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

LBLOCA – TU (BEPU)

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

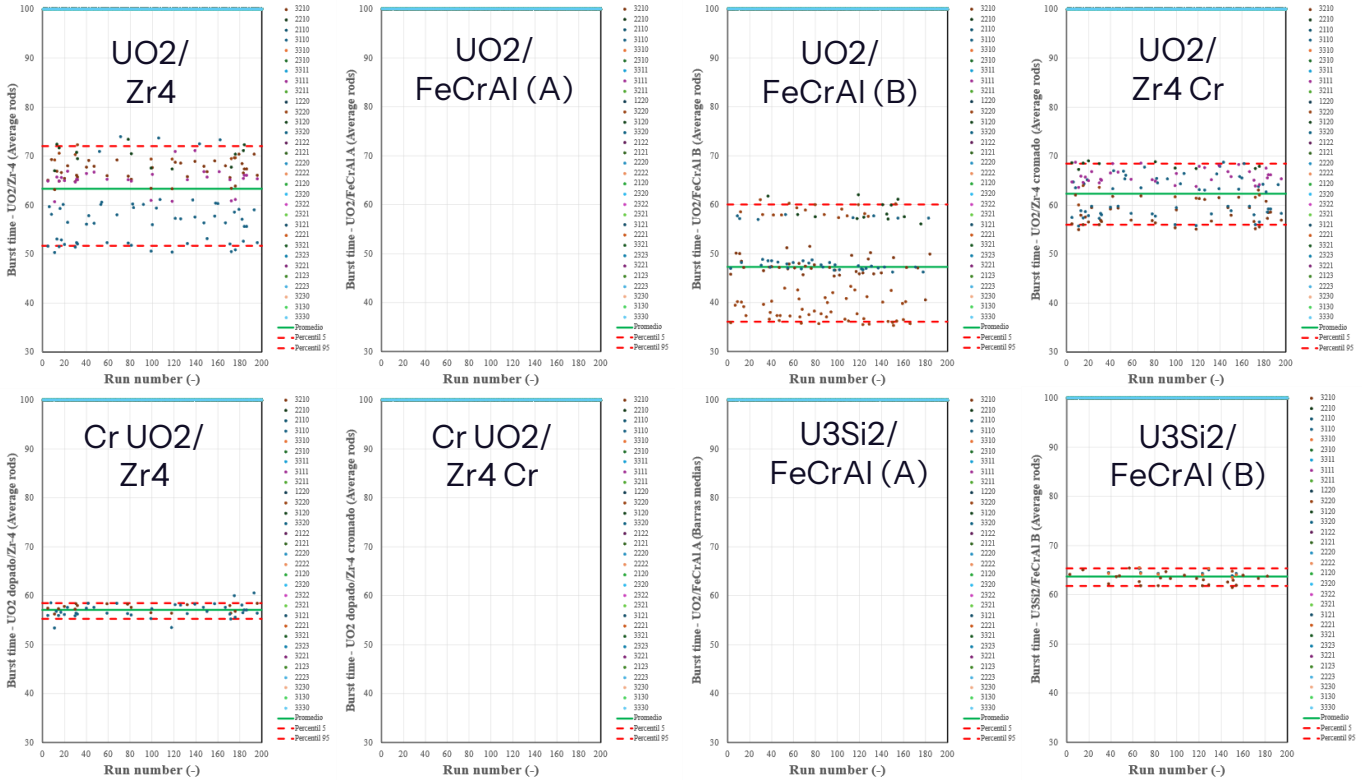


Simulaciones y resultados obtenidos

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

LBLOCA – TU (BEPU)

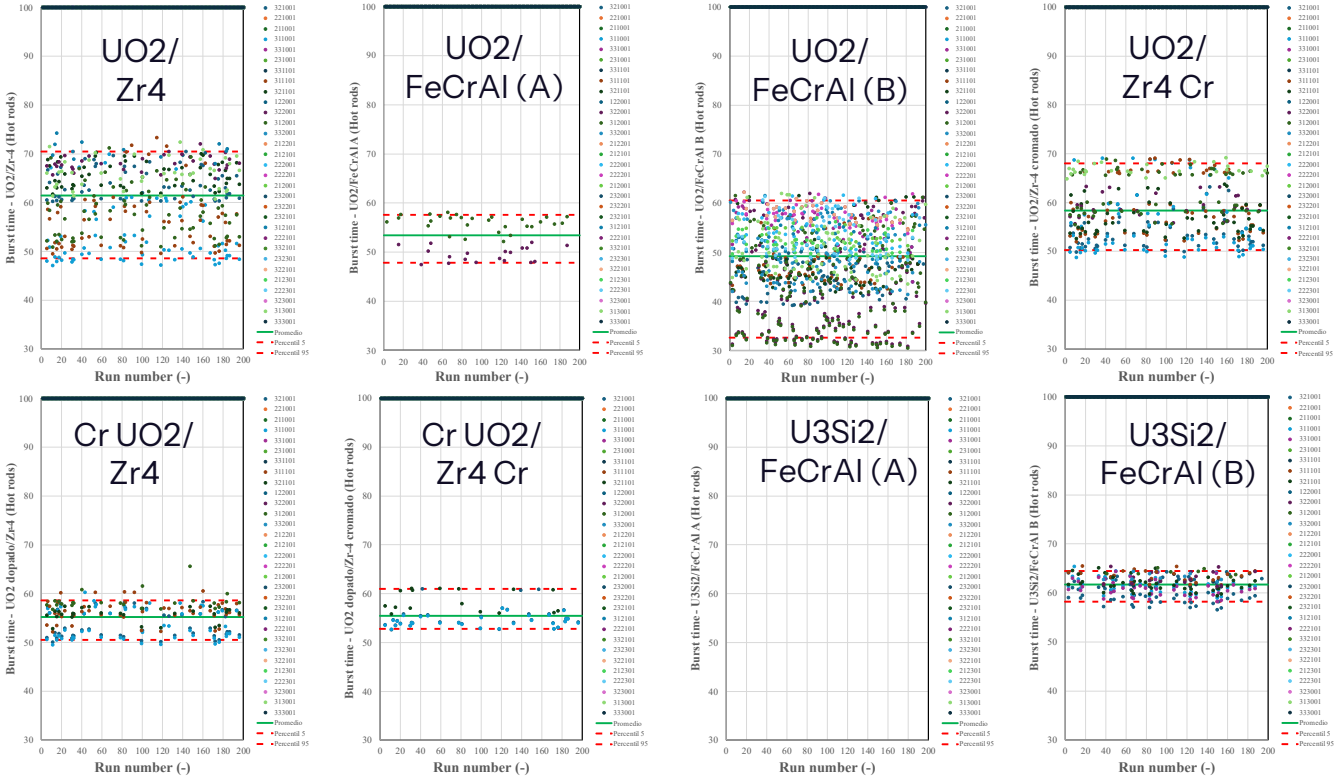
Tiempo de pinchazo (Barras medias)



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

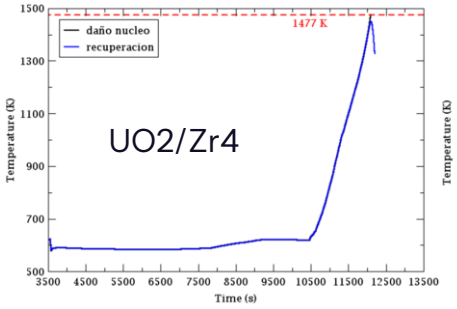
LBLOCA – TU (BEPU)

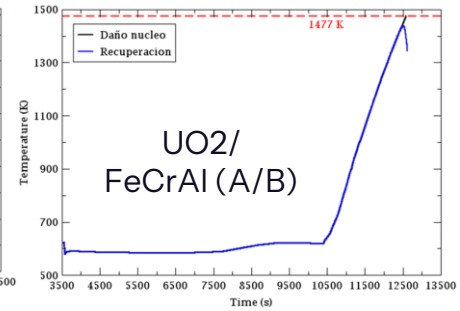
	Barras medias			Barras calientes		
Materiales de las barras combustibles	**Tiempo promedio de pinchazo (s)**	**Percentil 5**	**Percentil 95**	**Tiempo promedio de pinchazo (s)**	**Percentil 5**	**Percentil 95**
UO2/Zr-4	63.29	51.69	72.04	61.43	48.55	70.46
UO_2/FeCrAl (A)	-	-	-	53.41	47.86	57.63
UO_2/FeCrAl (B)	47.35	36.12	60.01	49.18	32.67	60.57
UO_2/ Zr-4 recub. de cromo	62.31	55.99	68.45	58.34	50.29	68.05
UO_2 dopado/Zr-4	57.12	55.31	58.50	55.22	50.54	58.58
UO_2 dopado/Zr-4 recub. de cromo	-	-	-	55.49	52.83	60.95
U_3Si_2/FeCrAl (A)	-	-	-	-	-	-
U_3Si_2/FeCrAl (B)	63.72	61.84	65.33	61.72	58.25	64.50

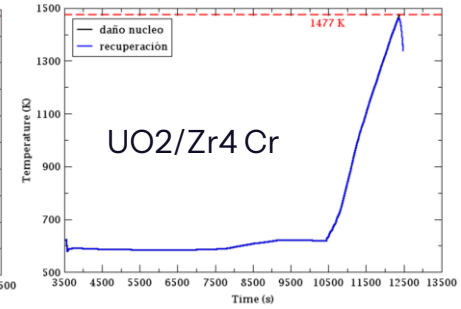
Paso 2-TRACE: Cálculo de los tiempos de disponibles

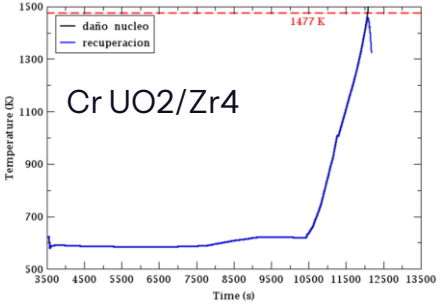
SBO DEC-A

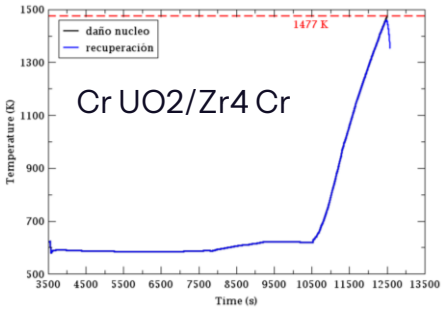
Material	t rec (min)	Δt (min)
UO2/Zr4	140.42	-
UO2/FeCrAl (A/B)	147.50	7.08
UO2/Zr4 Cr	145.52	5.00
Cr UO2/Zr4	140.33	-0.09
Cr UO2/Zr4 Cr	147.25	6.83
U3Si2/FeCrAl (A/B)	147.17	6.75

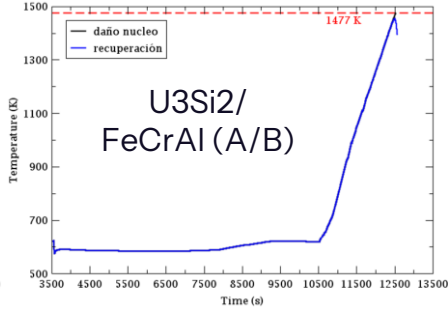












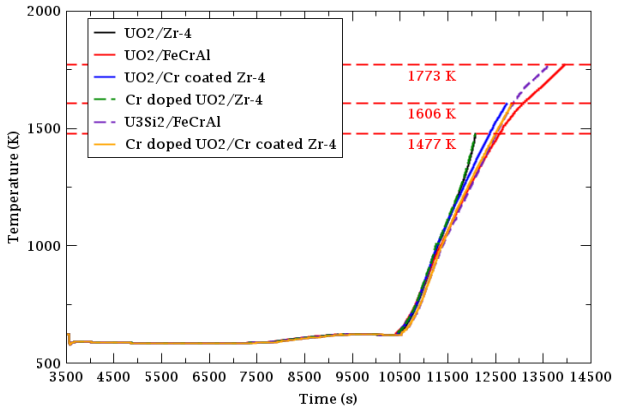
No se han obtenido pinchazos en las simulaciones con TRACE (verificado aplicando el paso 3 de la metodología con el código TU)

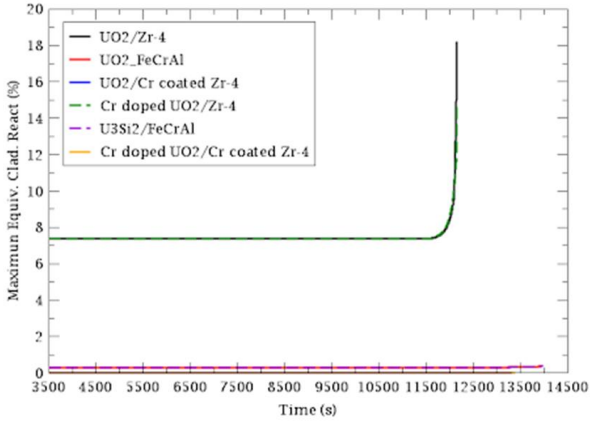
Simulaciones y resultados obtenidos

Paso 2-TRACE: Cálculo de los tiempos de daño

SBO DEC-B

	Materiales		Materiales + CAs	
Material	**t daño (min)**	**Δt (min)**	**t daño (min)**	**Δt (min)**
UO2/Zr4	142.28	-	142.28	-
UO2/FeCrAl (A/B)	150.57	8.29	173.46	31.18
UO2/Zr4 Cr	147.19	4.91	153.17	10.88
Cr UO2/Zr4	142.05	-0.23	142.05	-0.23
Cr UO2/Zr4 Cr	149.13	6.84	154.95	12.67
U3Si2/FeCrAl (A/B)	149.06	7.27	168.43	26.15





Conclusiones

4

Conclusiones

- 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 UO2 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.

Presentaciones y ponencias realizadas

1. E. Castro, 2022. '*Implementation of a creep correlation for Cr2O3 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'*. 48th 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. Castro1, 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.

nfq BEYOND CONSULTING

Presentaciones y ponencias realizadas

8. J. Sanchez-Torrijos, A. Soler, E. Castro, C. Queral, 2024. '*Simulation of the Halden IFA 650.10 LOCA test with TRACE and TRANSURANUS codes: Application to e-ATF materials'*. 50th Annual meeting of Spanish Nuclear Society, Cordoba, Spain.
9. J. Sanchez-Torrijos, Y. Martínez-Gonzalez, A. Soler, E. Castro, C. Queral, 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. Queral, 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. Queral, 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*'. 51st 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.

Agradecimientos

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

jorge.sanchez@nfq.es