

Document downloaded from:

<http://hdl.handle.net/10251/61032>

This paper must be cited as:

Hidalga García-Bermejo, P.; Abarca Giménez, A.; Miró Herrero, R.; Barrachina Celda, TM.; Verdú Martín, GJ. (2014). Validación del código subcanal CTF por medio de los resultados experimentales de Benchmark PSBT de la OECD/NEA. 40ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. Grupo Senda.



The final publication is available at

<http://www.reunionanualsne.es/doc/40/ponencias/tecnicas/I+D+i/22/22-04.pdf>

Copyright Grupo Senda

Additional Information

## VALIDACIÓN DEL CÓDIGO SUBCANAL CTF POR MEDIO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL BENCHMARK PSBT DE LA OECD/NEA

Patricio Hidalgo, Agustín Abarca, Rafael Miró, Teresa Barrachina, Gumersindo Verdú  
*Institute for Industrial, Radiophysical and Environmental Safety (ISIRYM)*  
*Universitat Politècnica de València (UPV)*  
*Camí de Vera s/n, 46021 València, Spain*  
aabarca@iqn.upv.es  
rmiro@isirymp.upv.es  
pathigar@etsii.upv.es  
tbarrachina@isirymp.upv.es  
gverdu@isirymp.upv.es

**Resumen** – *El análisis de seguridad en reactores se ha incrementado rápidamente en las últimas décadas. Debido a esto se han visto desarrollados métodos avanzados para la predicción de la fenomenología que tiene lugar en el núcleo del reactor. Este desarrollo se hace significativo en el campo termohidráulico centrado en la escala subcanal. CTF es una versión del código subcanal COBRA-TF mejorada por el ISIRYM. El código ha de ser validado comparando datos de experimentales y los resultados obtenidos al modelar el evento correspondiente, dentro la variedad de transitorios posibles. Como parámetro de para el análisis de reactores de agua ligera se emplea la fracción de huecos. Este parámetro será analizado en diversos escenarios del benchmark incluyendo estado estacionario y transitorio. Los resultados mostrados en este trabajo muestran una predicción satisfactoria por parte del código CTF en la simulación de los distintos casos del benchmark PSBT modelados. Además las posibles discrepancias han sido justificadas empleando datos de distintos códigos participantes en el benchmark. Esto permite a su vez comparar la capacidad del CTF en relación con el estado de las diversas herramientas de simulación en la actualidad en el campo de la termohidráulica a escala subcanal, y situando el código CTF en una buena posición comparativa para la predicción de la fracción de huecos.*

### 1 INTRODUCCIÓN

En este estudio, el código CTF se emplea para analizar el comportamiento del refrigerante a través del haz de varillas de combustible en un reactor de agua ligera. Para llevar

esta tarea a cabo, dicho código resuelve la ecuación de transporte para masa, energía y momento cinético en tres campos de fluido: líquido, vapor y líquido con partículas condensadas. Además, este entorno es de carácter heterogéneo al contar con dos fluidos posibles en dos fases distintas.

La discretización del modelo se diseña axialmente y en los consiguientes planos. En el aspecto axial, es de gran importancia hacer coincidir los nodos con el espacio ocupado con el ancho de los espaciadores para así asegurar la correcta caída de presión. La discretización en el plano corresponde a las regiones que rodean el pin de combustible o que se haya entre un pin y la pared del elemento combustible. Después de la discretización del modelo, se establecen las condiciones de generación de potencia y condiciones iniciales tales como presión, flujo másico y entalpía a la entrada y la salida.

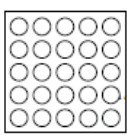
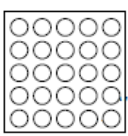
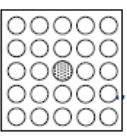
En el caso de modelar un caso transitorio el usuario describe las condiciones de contorno por medio de tablas de valores en función de la variable tiempo. Toda la información correspondiente a los cambios en los parámetros antes mencionados se recoge en los informes técnicos del *benchmark* PSBT de la OECD/NEA. El objetivo del artículo es validar los modelos físicos y numéricos implementados en el código CTF con los resultados experimentales del *benchmark* [1].

El artículo se centra en el análisis de los resultados sobre la fracción de huecos en concordancia con el proceso del *benchmark*, que será detallado en lo sucesivo. Esta comparación se realiza tanto en estacionario como en transitorio en diferentes configuraciones de elemento combustible. A pesar de que la fracción de huecos no es un parámetro relevante en condiciones normales de operación de un PWR, se convierte en algo reseñable en casos transitorios, sobre todo para combustibles con alta potencia. La importancia de este hecho recae en cómo se redistribuye el flujo del refrigerante a través del elemento combustible afectando a la transferencia de calor, y a su vez, como esto afecta al incremento de temperatura en dichos elementos combustibles, concretamente, en los pines y las vainas. Todo ello revierte en el *feedback* neutrónico y como varía la criticidad del núcleo. Por todo esto es por lo que la fracción de huecos es un parámetro relevante en el análisis de seguridad en los reactores de agua ligera.

El artículo detalla la validación de las medidas proporcionadas por los cálculos del código CTF con los resultados del *benchmark* PSBT. Estos datos experimentales han sido seleccionados por su consistente base de datos termohidráulicos y el detalle para modelar las instalaciones. A pesar de que el *benchmark* proporciona numerosos casos experimentales, como se ha mencionado anteriormente, este artículo se centrará en el estado estacionario para tres configuraciones de elemento combustible, y 4 casos transitorios para esas mismas 3 tres configuraciones.

## 2. MODELADO DE LOS CASOS

El *benchmark* PSBT proporciona toda la información técnica de geometría de las instalaciones para poder diseñar los inputs de CTF [2]. Se han modelado 3 elementos combustibles a tamaño completo (B5, B6 y B7). La figura 1 muestra los datos geométricos y el alzado esquemático de los elementos combustibles. Todos ellos son elementos 5x5 pero el modelo B7 tiene alojada un *thimble rod* en la posición central en lugar de un pin de combustible. Asimismo los perfiles de potencia axial y radial son diferentes. La distribución radial corresponde con el tipo A para las configuraciones B5 y B6, y el tipo B para la B7. La distribución radial se muestra en la figura 2.

Item	Data		
Assembly			
	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>
Rods array	5×5	5×5	5×5
Number of heated rods	25	25	24
Number of thimble rods	0	0	1
Heated rod outer diameter (mm)	9.50	9.50	9.50
Thimble rod outer diameter (mm)	-	-	12.24
Heated rods pitch (mm)	12.60	12.60	12.60
Axial heated length (mm)	3658	3658	3658
Flow channel inner width (mm)	64.9	64.9	64.9
Radial power shape	A	A	B
Axial power shape	Uniform	Cosine	Cosine
Number of MV spacers	7	7	7
Number of NMV spacers	2	2	2
Number of simple spacers	8	8	8
MV spacer location (mm)	471, 925, 1378, 1832, 2285, 2739, 3247		
NMV spacer location (mm)	2.5, 3755		
Simple spacer location (mm)	237, 698, 1151, 1605, 2059, 2512, 2993, 3501		

○: Heated rod ●: Thimble rod

MV: Mixing vane, NMV: No mixing vane

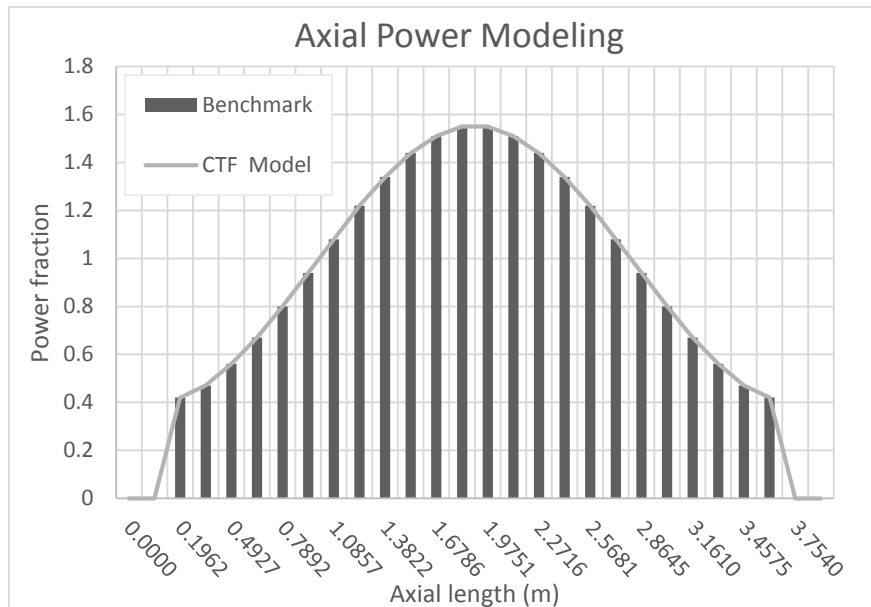
Spacer location is distance from bottom of heated length to spacer bottom face.

**Figura 1. Esquema y datos geométricos para las configuraciones del benchmark.**

El modelo B5 tiene un perfil axial uniforme mientras que el B6 y el B7 tienen perfil cosenoidal. El perfil axial ha sido adaptado a los modelos de CTF por medio de sus opciones disponibles. El documento técnico del benchmark especifica la fracción de potencia para cada región axial, mientras que el CTF interpola los valores a través de los valores nodales. El perfil axial de potencia se puede observar en la figura 3.

0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	1.00	1.00	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	0.00	1.00	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	1.00	1.00	0.85
0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

**Figure 2. Distribución de potencia radial para B5 y B6 (izquierda), y B7 (derecha).**



**Figure 3. Comparación de la distribución axial de potencia.**

El modelado de los espaciadores se ha realizado por medio de afinar la malla axial en las alturas pertinentes para hacerlas coincidir con el ancho axial de dicho espaciador. Asimismo se han afinado también los nodos coincidentes con los puntos de medida para proporcionar una lectura de datos más precisa, ya que el valor de la región axial será promedio del nodo.

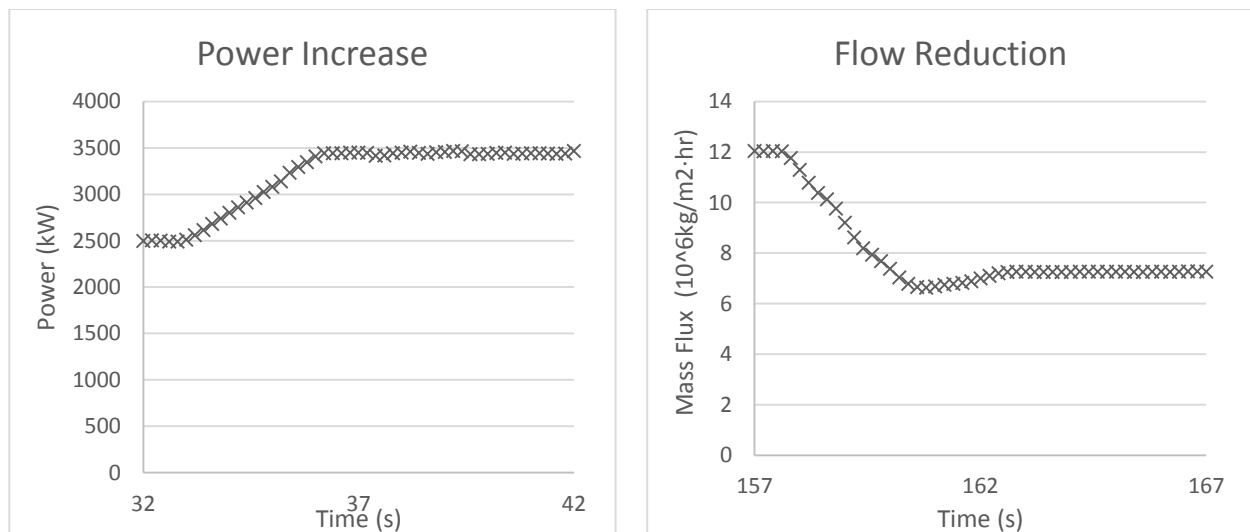
En las regiones axiales correspondientes a los espaciadores se ha introducido la caída de presión equivalente a la que provocarían dichos elementos. Esto da un coeficiente de 0.40 para el espaciador simple; 0.70 para el espaciador sin flujo cruzado; y 1.00 para el espaciador con flujo cruzado.

## 2.1. Estado estacionario

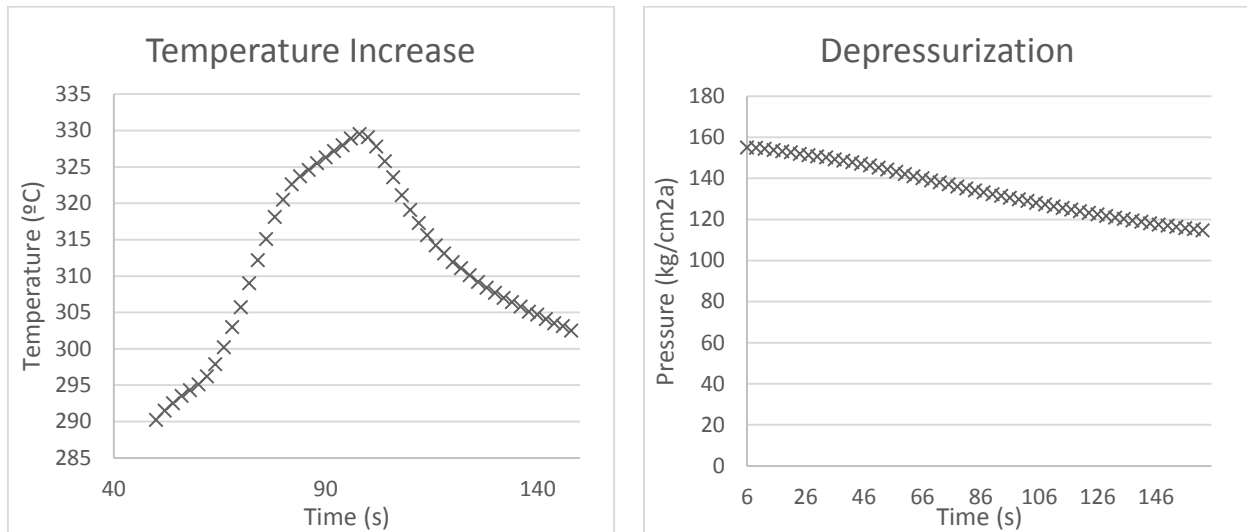
Una vez se ha hecho el diseño geométrico se ejecutan los casos en 4 sets distintos de condiciones de contorno. Estos sets serán el 5 y el 8, para el modelo B5; el set 6 para el modelo B6; y el set 7 para el modelo B7. Para cada set de condiciones de contorno se realizaron numerosas mediciones. Estos sets muestran los valores resultantes de los parámetros medidos en función de la presión durante el experimento en la entrada de la instalación. Estos valores de presión van desde los 50 hasta los 168 bares aproximadamente. Los valores de flujo másico y potencia también varían a lo largo de los sets desde los  $5 \cdot 10^6$  a  $11 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>h y desde 1000 a 4000 kW, respectivamente. La variación de los parámetros puede revisarse en el documento de las especificaciones técnicas del *benchmark* [3].

## 2.2. Modelado del estado transitorio

El modelado de los transitorios está basado en 4 casos: Incremento de potencia (PI), reducción de flujo (FR), despresurización (D) e incremento de temperatura (TI). Cada uno de los casos se ejecuta para los modelos B5, B6 y B7. Los parámetros del transitorio varían a lo largo del tiempo con el mismo comportamiento aproximado en todos los casos. Las figuras 6 y 7 muestran la variación de dichos parámetros, para el caso concreto del modelo B7.



**Figura 6. Incremento de potencia (izquierda) y reducción de flujo másico (derecha).**



**Figura 7. Incremento de temperature (izquierda) y despresurización (derecha).**

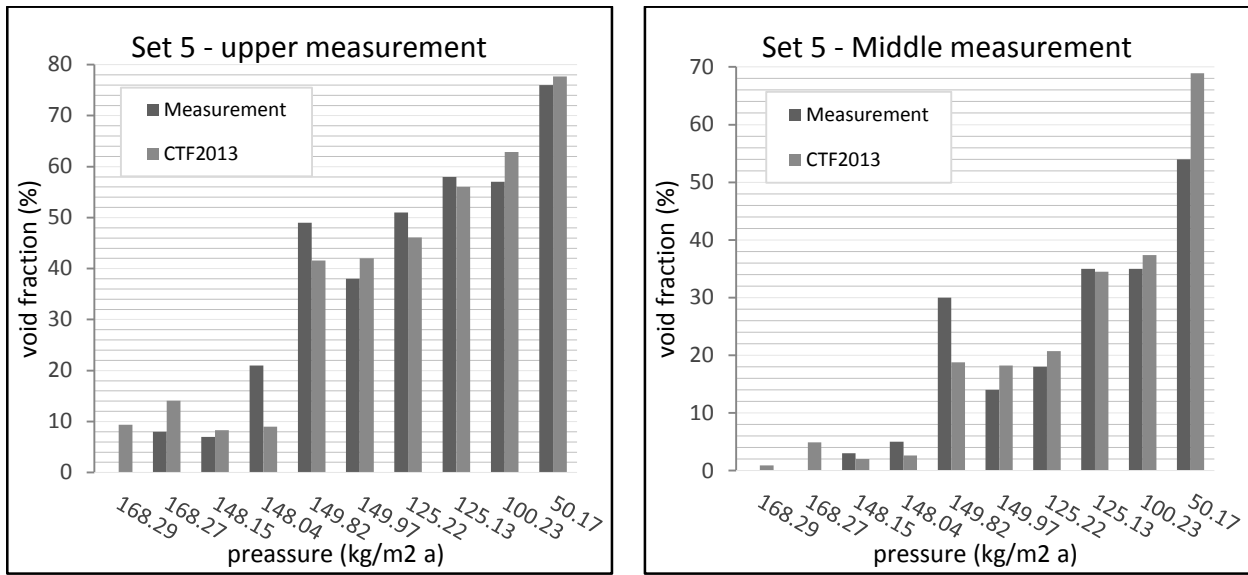
### 3 COMPARACIÓN Y RESULTADOS

Para exponer la comparativa de datos de manera coherente los puntos en CTF se establecen en las mismas coordenadas axiales que los puntos de medida en la instalación. El volumen de las celdas en el código (nodos) se ha hecho suficientemente pequeño para que, a la hora de obtener valores, el promedio de la celda no incurra en un error inaceptable. Los puntos de medida son representativos del comportamiento del fluido de estudio en el elemento combustible mdoelado. El área correspondiente promedia entre 4 subcanales rodeando el pin central. Los tres puntos de medida corresponden con las alturas en milímetros: 3177 (Upper), 2669 (Middle) y 2216 (Lower). Las comparativas tienen el objetivo de probar los resultados de la última versión del código CTF desarrollada en el ISIRYM (CTF 2013). A fin de no exceder en exposición de datos, para este artículo se ha seleccionado las comparaciones más significativas.

#### 3.1 Comparaciones de estado estacionario

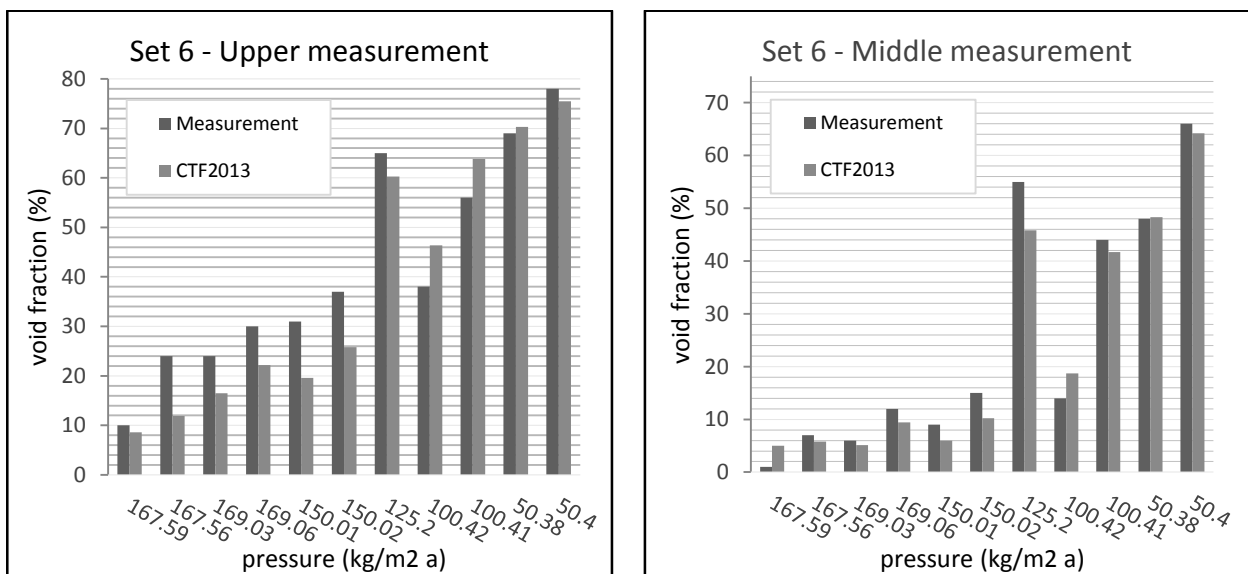
Los datos siguientes hacen referencia a los sets de los cálculos en estado estacionario. La comparación del parámetro fracción de huecos se muestra en función de la presión a la entrada en cada caso.

#### Comparación en estado estacionario del set de datos número 5



**Figura 8. Comparación de datos del set 5 en los puntos de medida 3177 mm y 2669 mm.**

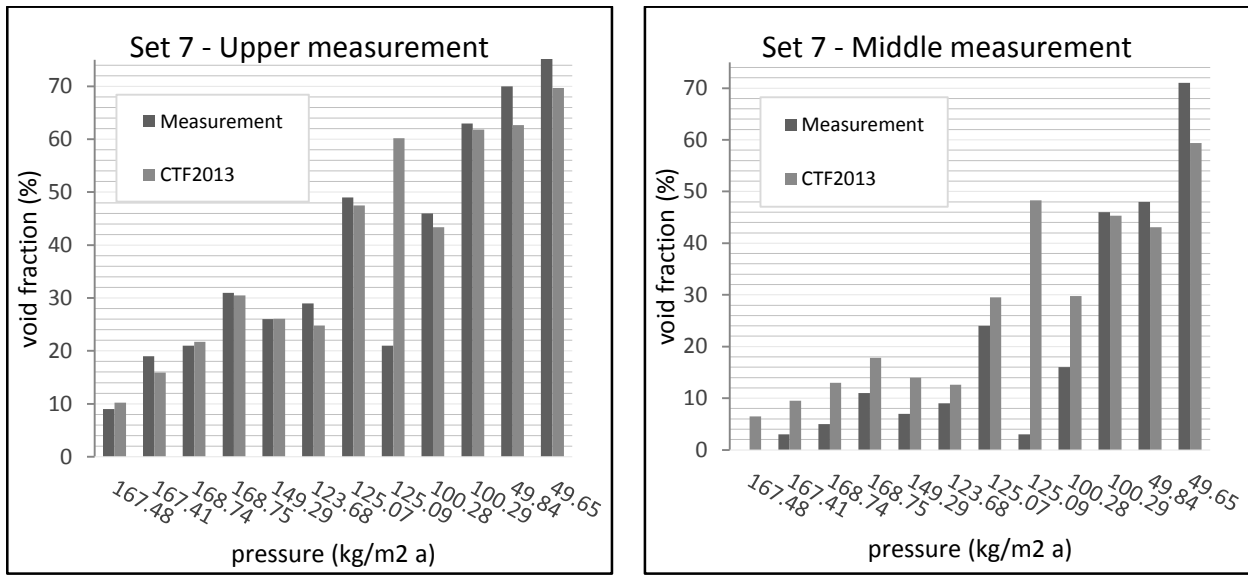
**Comparación en estado estacionario del set de datos número 6**



**Figura 9. Comparación de datos del set 6 en los puntos de medida 3177 mm y 2669 mm.**

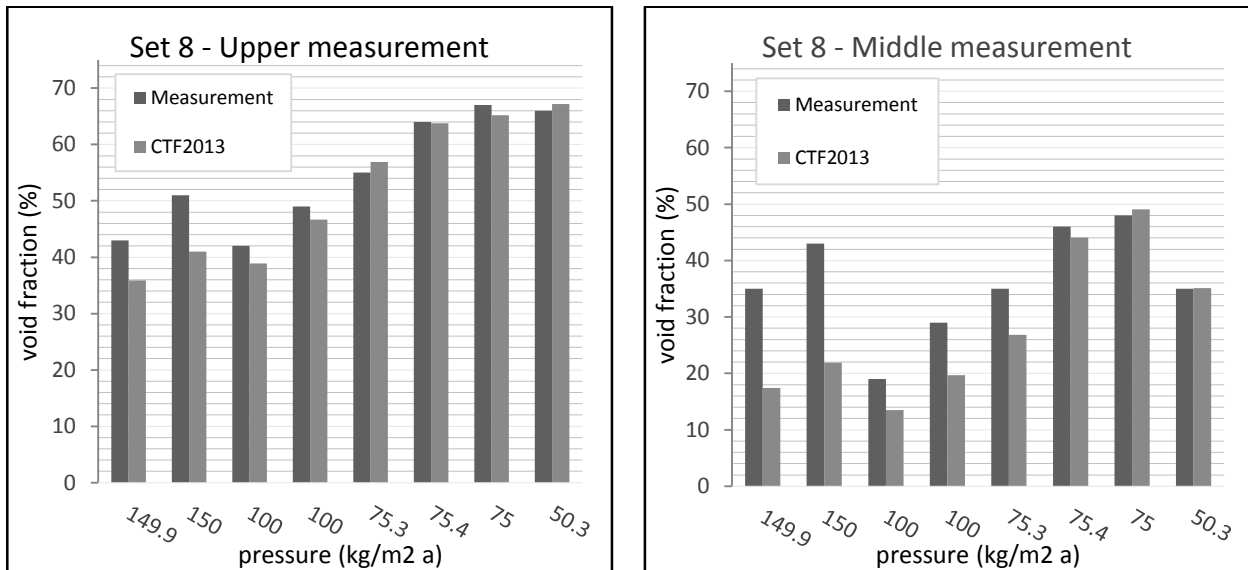
**Comparación en estado estacionario del set de datos número 7**





**Figura 10. Comparación de datos del set 7 en los puntos de medida 3177 mm y 2669 mm.**

**Comparación en estado estacionario del set de datos número 8**



**Figura 11. Comparación de datos del set 8 en los puntos de medida 3177 mm y 2669 mm.**

En términos generales, todas las comparaciones muestran muy Buena concordancia entre los resultados del código CTF y los datos experimentales. En la mayoría de los casos las discrepancias de la fracción de huecos suponen un 6% de error relativo. Sin embargo existen casos aislados en los valores experimentales son inusualmente mayores.

El set de resultados 7 muestra una diferencia significativa para la presión de 125.09 kg/m<sup>2</sup>. Resultados similares se dan en el caso del set 5 en el punto de medida 3177 mm. El caso es para una presión de 148 kg/m<sup>2</sup>, o el caso del set 8 en 150 kg/m<sup>2</sup> para el punto intermedio de medida. Para justificar estas discrepancias se alude a dos factores: por un lado, en algunos casos experimentales tienen condiciones de contorno equivalentes y sin embargo los valores de fracción de huecos son significativamente distintos, lo que podría deberse a un error en las medidas. Por otro lado la tabla 1 muestra la comparación de los valores calculados por otros códigos participantes en el *benchmark* del 2010 [4] y los resultados del código CTF. Puede apreciarse que los demás códigos muestran valores más coherentes con los obtenidos en el código CTF que con esos valores experimentales que se salen de lo predecible. Esto hace que dichas discrepancias puedan adjudicarse a errores en la instalación y no a las leyes que rigen estos fenómenos.

**Tabla 1. Comparación de resultados del set de datos 7 con otros códigos.**

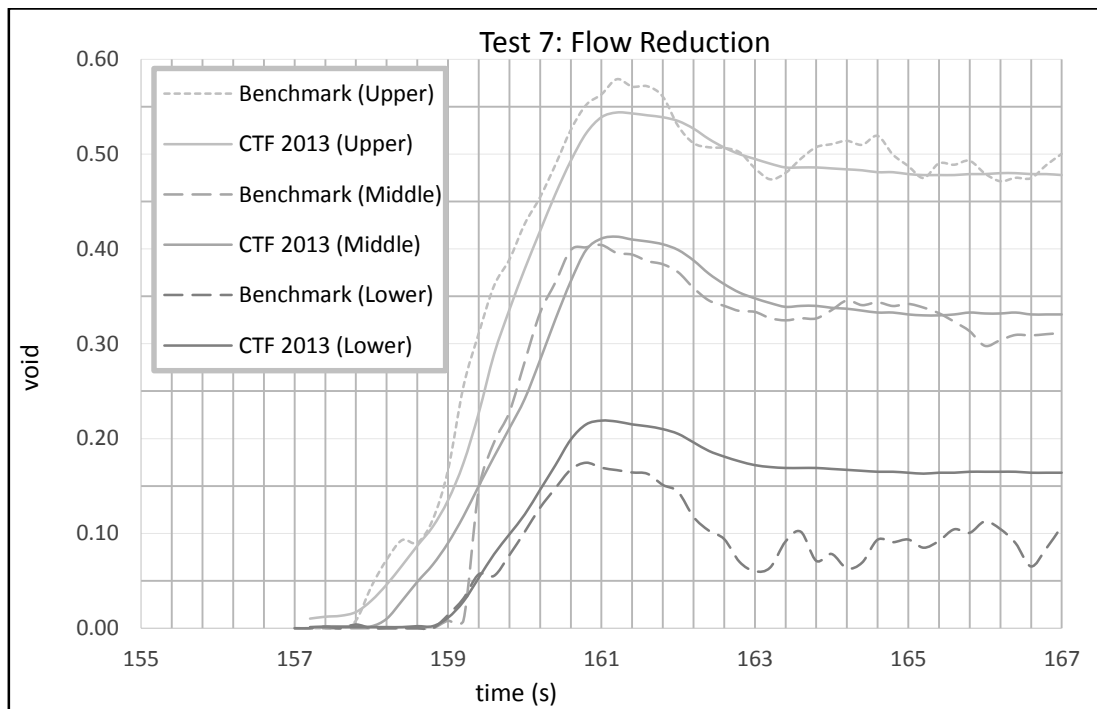
Presión (kg/cm <sup>2</sup> a)	167.48	167.41	168.74	168.75	149.29	123.68	125.07	125.09	100.28	100.29	49.84	49.65
Code	Upper Measurement											
KIT (Subchanflow)	0.063	0.150	0.200	0.275	0.476	0.640	0.250	0.250	0.475	0.600	0.590	0.730
CEA-Saclay (FLICA-OVAP)	0.060	0.140	0.148	0.250	0.435	0.620	0.220	0.265	0.437	0.575	0.575	0.720
PSI (FLICA)	0.025	0.125	0.150	0.265	0.462	0.625	0.230	0.225	0.462	0.585	0.580	0.725
AREVA (F-COBRA-TF)	0.055	0.120	0.148	0.250	0.450	0.580	0.185	0.175	0.450	0.580	0.610	0.680
KTH (TRACE)	0.055	0.125	0.170	0.251	0.410	0.530	0.230	0.210	0.420	0.530	0.540	0.650
KAERI (MATRA)	0.082	0.151	0.175	0.260	0.440	0.600	0.245	0.245	0.425	0.551	0.565	0.675
ISIRYM(CTF)	0.102	0.159	0.217	0.305	0.434	0.627	0.261	0.248	0.475	0.602	0.618	0.697
	Middle Measurement											
KIT (Subchanflow)	0.025	0.075	0.105	0.108	0.390	0.470	0.125	0.125	0.325	0.500	0.485	0.635
CEA-Saclay (FLICA-OVAP)	0.030	0.050	0.050	0.095	0.280	0.345	0.065	0.100	0.220	0.460	0.420	0.585
PSI (TRACE)	0.029	0.070	0.090	0.165	0.315	0.375	0.135	0.120	0.270	0.425	0.405	0.520
AREVA (F-COBRA-TF)	0.037	0.060	0.075	0.125	0.285	0.340	0.095	0.080	0.250	0.455	0.430	0.545
KTH (TRACE)	0.025	0.065	0.105	0.175	0.260	0.425	0.125	0.130	0.300	0.450	0.425	0.555
KAERI (MATRA)	0.065	0.125	0.125	0.195	0.245	0.450	0.165	0.160	0.290	0.451	0.450	0.595
ISIRYM(CTF)	0.065	0.095	0.13	0.178	0.298	0.431	0.14	0.126	0.295	0.483	0.453	0.594
	Lower Measurement											
KIT (Subchanflow)	0.000	0.013	0.012	0.051	0.030	0.060	0.015	0.015	0.110	0.320	0.245	0.340
CEA-Saclay (FLICA-OVAP)	0.020	0.025	0.025	0.037	0.052	0.065	0.025	0.025	0.065	0.180	0.137	0.235

PSI (TRACE)	0.005	0.023	0.022	0.052	0.050	0.129	0.038	0.025	0.115	0.265	0.175	0.312
AREVA (F-COBRA-TF)	0.005	0.022	0.012	0.037	0.025	0.083	0.025	0.040	0.075	0.220	0.130	0.235
KTH (TRACE)	0.000	0.014	0.040	0.075	0.085	0.230	0.045	0.050	0.175	0.318	0.230	0.360
KAERI (MATRA)	0.023	0.063	0.037	0.080	0.000	0.133	0.050	0.060	0.095	0.290	0.165	0.383
ISIRYM(CTF)	0.004	0.034	0.02	0.062	0.058	0.122	0.043	0.056	0.105	0.262	0.184	0.278

### 3.2 Comparación de los casos transitorios

Las siguientes figuras comparan la variación de los parámetros de estudio para cada caso transitorio. Se muestran al igual que en el caso estacionario, por los motivos ya mencionados, únicamente las comparaciones del modelo B7, ya que los resultados son similares en todos los modelos.

#### Comparación de los resultados del modelo B7 en caso transitorio



**Figura 12. Transitorio de reducción de flujo para el modelo B7.**

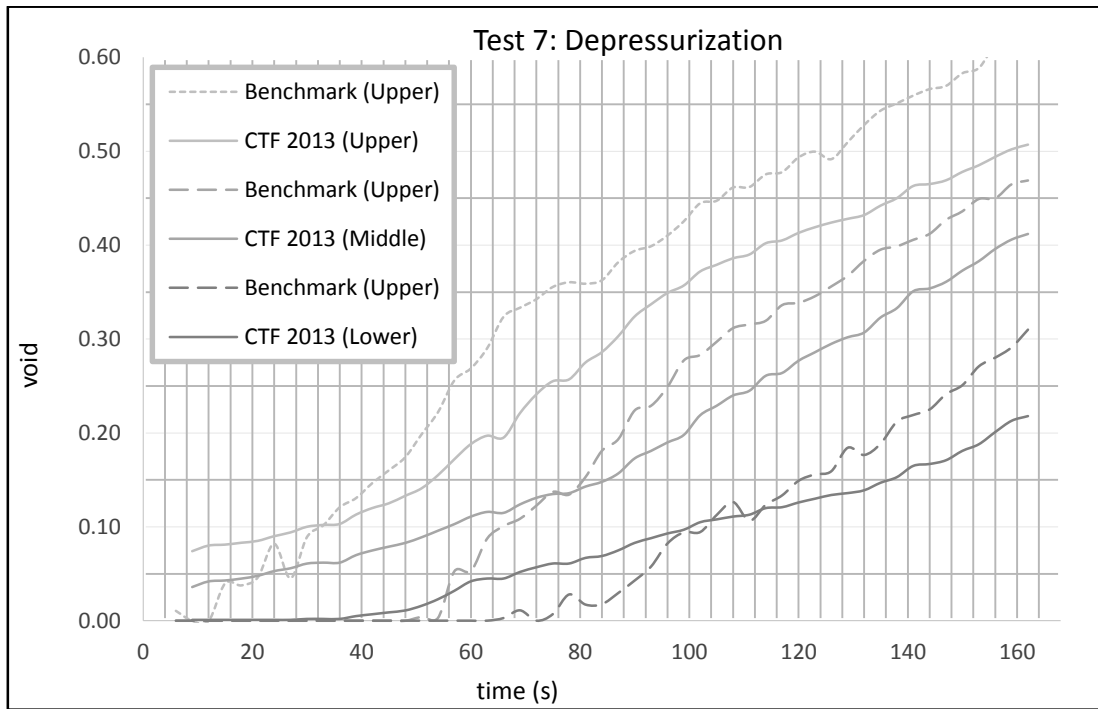


Figura 13. Transitorio de despresurización para el modelo B7.

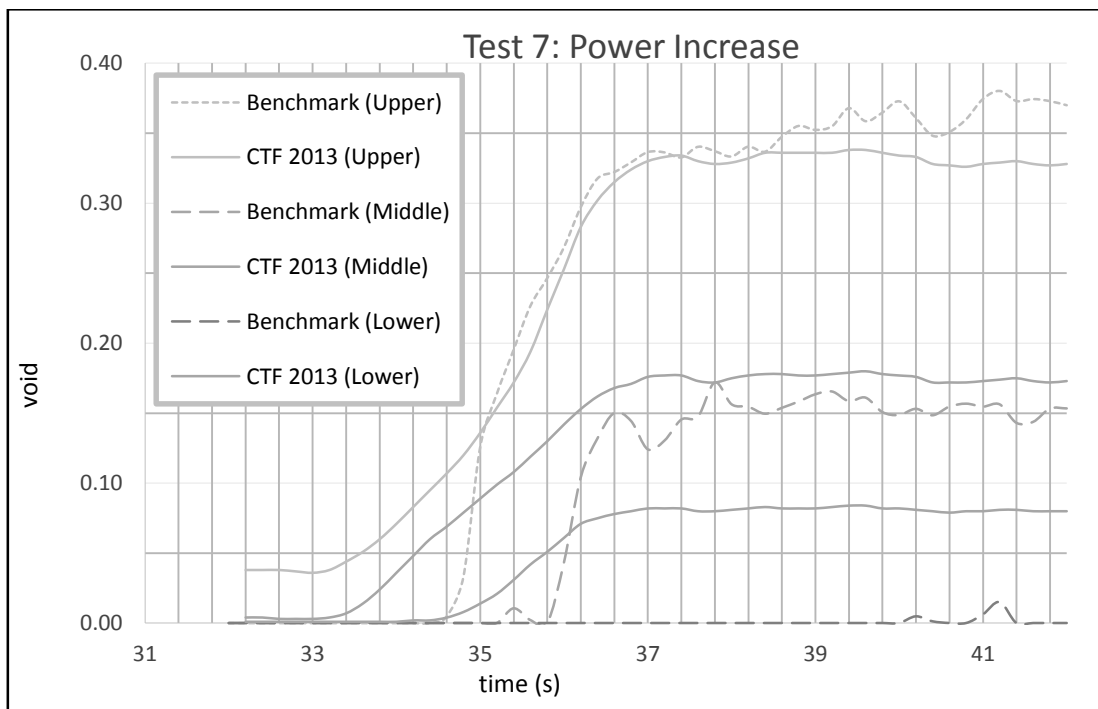
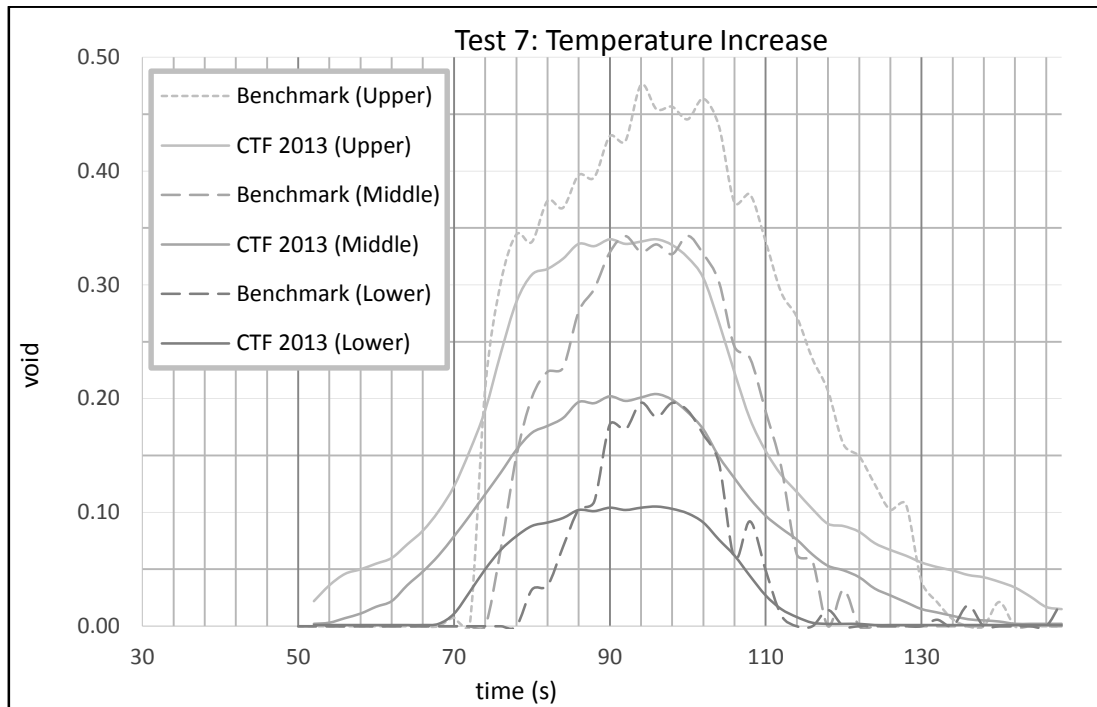


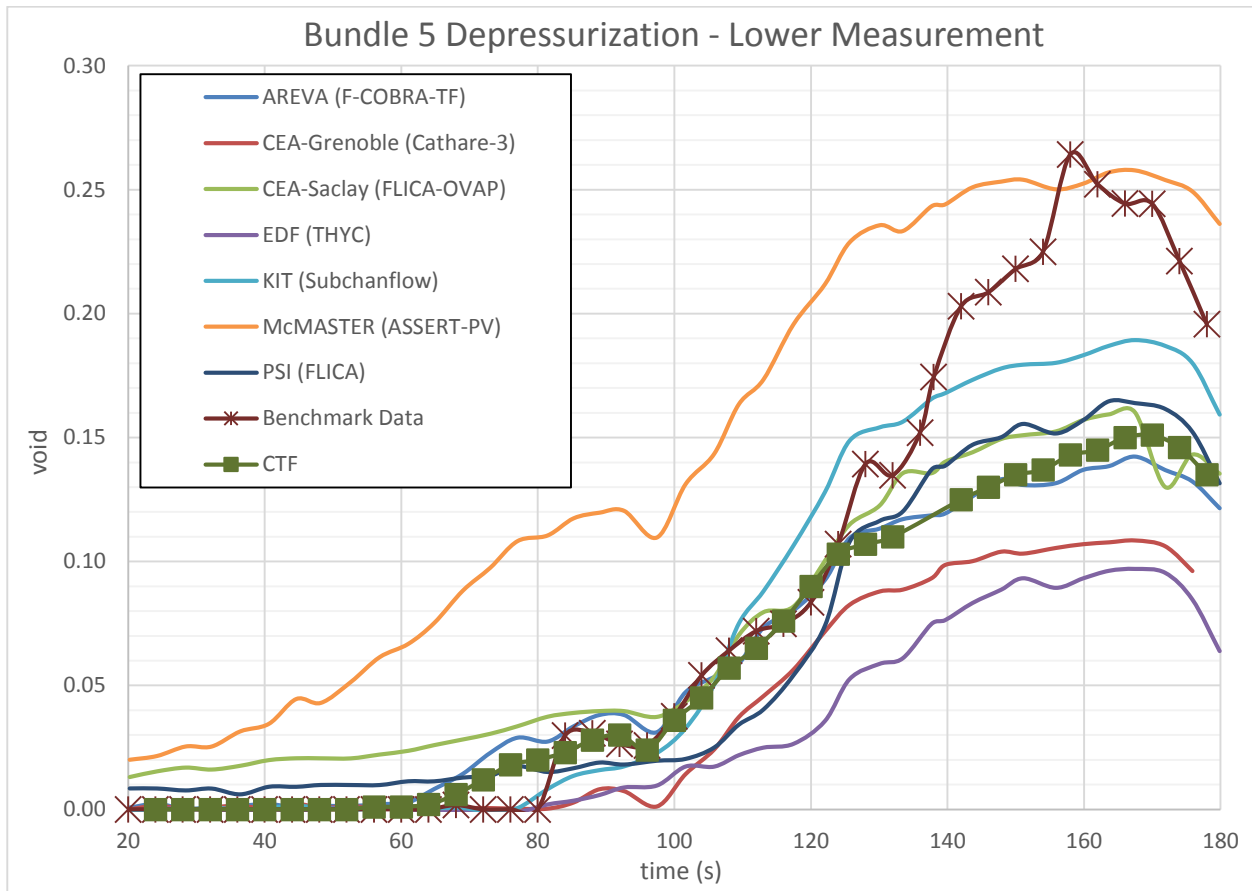
Figura 14. Transitorio de incremento de potencia para el modelo B7.



**Figure 15. Transitorio de incremento de temperatura para el modelo B7.**

Los resultados de los casos transitorios del CTF muestran buena coherencia y consistencia en comparación con los datos experimentales. Cabe comentar que los datos experimentales muestran valores ligeramente oscilantes mientras que la predicción del CTF es continua. Las discrepancias que se aprecian pueden relacionarse con los métodos de discretización implementados en el código a través de los métodos numéricos.

En el principio del transitorio los datos experimentales se mantienen constantes mientras que CTF predice un incremento de la fracción de huecos con una pendiente más suave. Alrededor del primer cuarto de simulación los datos experimentales presentan una pendiente incremental más acusada que la predicción realizada por el CTF. Este comportamiento es más significativo en los transitorios PI y TI (ver figuras 14 y 15). En términos generales, CTF tienen a predecir valores por encima de los datos experimentales si observamos el punto bajo de medida. Ello puede explicarse debido a que los cálculos computacionales no permiten divisiones con denominador nulo, por lo que se emplean valores muy reducidos. Este error puede propagarse a través de los cálculos, haciendo que no se produzca valor cero en la fracción de huecos.



**Figura 16. Comparación de resultados de CTF, experimentales y otros códigos participantes en el benchmark.**

Las mayores diferencias se muestran para el transitorio T1. El resto de casos muestran un error relativo medio de 10% aproximadamente. Este error tiende a ser mayor para el punto inferior de medida y menor para el punto superior. Esto se atribuye a la altura de los puntos de medida ya que a mayor altura la presencia de vapor es más clara, mientras que a alturas inferiores el fenómeno de vaporización está presente y puede no ser detectado con toda la precisión por la instalación.

#### 4 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados predichos por CTF se han comparado con los ejercicios del PSBT, tanto para transitorios como estado estacionario. El resultado global es una consistente predicción de la fracción de vapor. Los resultados finales han mostrado que las opciones disponibles en el código permiten una modelación coherente de las condiciones y las características de la instalación. Las diferencias que pudieran darse entre los resultados

se han atribuido a los métodos de discretización implementados en el código, así como los métodos numéricos. Asimismo sería de interés comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos experimentalmente, para descartar otras fuentes de discrepancias.

De cara al trabajo futuro sobre el código se plantea la validación de la predicción de fracción de huecos con códigos ya validados. Ello permitiría la comparación de los métodos numéricos a aplicar, así como las ecuaciones físicas planteadas. A fin de asegurar la buena capacidad del código CTF, se plantea también realizar la comparación experimental del benchmark BFBT de la OECD/NEA.

## REFERENCIAS

- [1] “*OECD/NRC Benchmark Based on NUPEC PWR Sub-channel and Bundle Tests (PSBT) First Workshop (PSBT-1)*”, OECD/NEA Nuclear Science Committee and Committee On The Safety Of Nuclear Installations (2010)
- [2] M. Avramova, K. Ivanov, “*CTF - A Thermal-Hydraulic Subchannel Code for LWRs Transient Analyses User’s Manual*”, PSU, Pennsylvania, USA (2003)
- [3] A. Rubin, A. Schoedel, M. Avramova, “*OECD/NRC BENCHMARK BASED ON NUPEC PWR SUBCHANNEL AND BUNDLE TESTS (PSBT)*” Vol. I, PSU, USA (2010)
- [4] A. Rubin, M. Avramova, “*Comparative Analysis of Submitted. Final Results for Exercise I-2*” 2nd OECD/NRC PSBT Workshop. Stockholm, Sweden (2011)