

## VALIDACIÓN DE MODELO CFD MULTIFÁSICO DE DRENAJE DEL TANQUE REFLECTOR DEL REACTOR OPAL

**Patricio A. Alberto, Ignacio Garnero**

*INVAP S.E., Av. Cmte. Luis Piedrabuena 4950, S. C. de Bariloche, Río Negro, Argentina*  
*PAAlberto@invap.com.ar, IGarnero@invap.com.ar, <http://www.invap.com.ar>*

**Palabras Clave:** CFD, Multifásico, Reactor multipropósito, Segundo Sistema de Parada.

**Resumen.** En un reactor nuclear, ante alguna anomalía en el funcionamiento del mismo, por ejemplo, fallas en los sistemas asociados a la refrigeración, deben existir mecanismos que permitan el rápido apagado del reactor para asegurar la integridad estructural del núcleo y sus componentes. Algunas instalaciones deben contar con dos sistemas de parada, los cuales deben ser independientes y diversos entre sí. El reactor multipropósito OPAL cuenta con un primer sistema de parada que involucra la inserción de barras de control en el núcleo y un segundo sistema de parada que consiste en el vaciado del material reflector, en este caso, agua pesada. Las características y tiempos de vaciado son críticos para asegurar el correcto apagado del reactor. El objetivo del presente análisis es validar un modelo computacional de modo de contar con una herramienta confiable para diseños futuros de tanques reflectores y sus sistemas de seguridad asociados. Para ello se desarrolló, en ANSYS Fluent, un modelo transiente multifásico agua-aire a fin de predecir, mediante el uso de CFD, la curva de caudal y de nivel dentro del tanque reflector en función del tiempo. Los resultados obtenidos son comparados con mediciones tomadas en un modelo físico a escala 1:1 construido para tal fin.

## 1 INTRODUCCIÓN

El reactor nuclear OPAL (*Open-Pool Australian Lightwater Reactor*) es un reactor multipropósito de 20 MW inaugurado oficialmente en el año 2007, en el Centro de Investigación de ANSTO en Lucas Heights, cerca de Sydney, Australia. El reactor fue provisto mediante un contrato “llave en mano” por la empresa INVAP S.E., quien se hizo cargo del diseño, construcción y puesta en marcha de la planta y todos sus sistemas.

Entre las principales funciones del reactor OPAL se destacan, la producción de radiofármacos, el dopado de Silicio y la investigación de materiales mediante difracción de neutrones, entre otras.

El núcleo del reactor cuenta con 16 elementos combustibles tipo MTR de bajo enriquecimiento, es decir, con uranio enriquecido al 19.7%. El núcleo se encuentra bajo 10 m de agua liviana ( $H_2O$ ) en una pileta abierta. Con el objetivo de optimizar la posición del pico máximo de neutrones térmicos, el reactor cuenta con un Tanque Reflector (TR) alrededor del núcleo con agua pesada ( $D_2O$ ).

La Figura 1 muestra una vista desde pileta del reactor OPAL operando a 20 MW de potencia. En la imagen se observa el núcleo de sección cuadrada en la zona central y el tanque reflector de sección circular, con múltiples posiciones de irradiación.

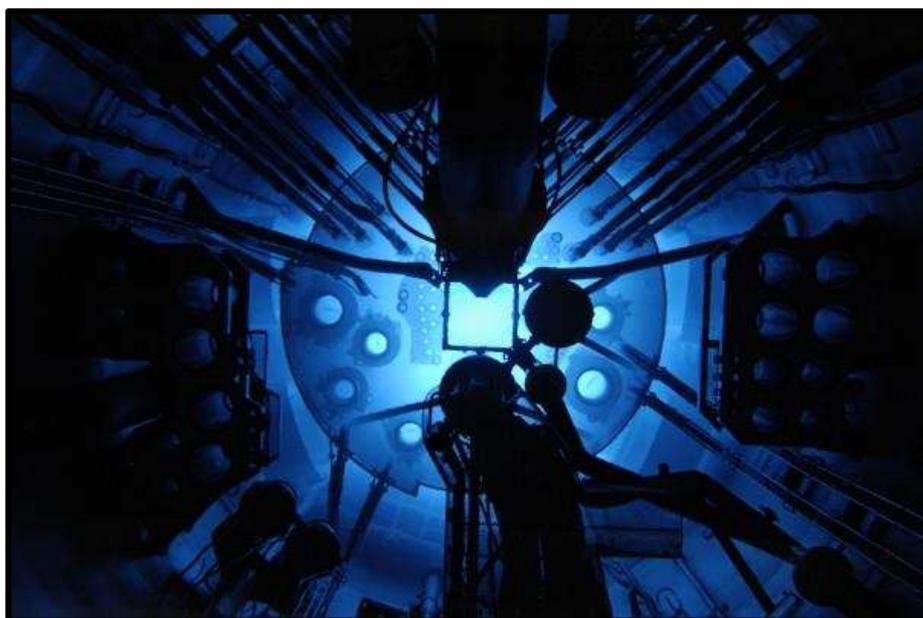


Figura 1: Reactor OPAL

Con el reactor en operación, una serie de variables de seguridad son monitoreadas continuamente. Cuando se alcanzan valores de *set point*, se activan sistemas de seguridad que provocan la rápida extinción de la reacción nuclear y el apagado del reactor.

El reactor OPAL cuenta con dos sistemas independientes, diversos y redundantes de apagado:

- Primer Sistema de Parada: Cinco barras de control mantienen su posición en operación normal mediante electroimanes, al activarse el primer sistema de parada, los electroimanes se desenergizan y las barras caen dentro del núcleo, asistidas neumáticamente, en menos de 0.5 segundos. Las barras contienen un material absorbente de neutrones que evita la continuidad de la reacción en cadena. La Figura 2 muestra un esquema del núcleo y la posición de las barras de control.

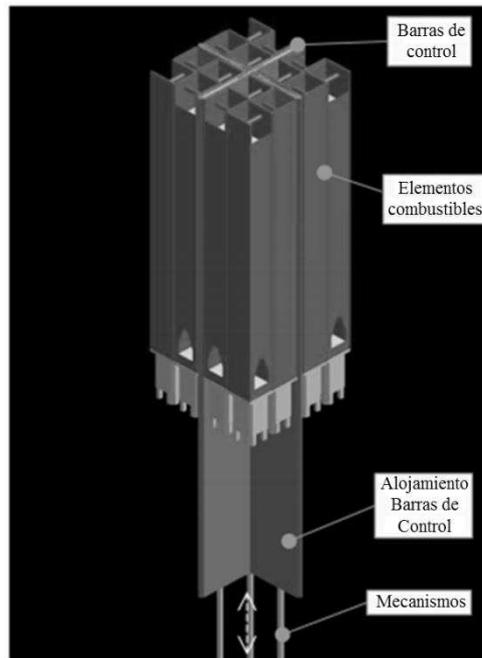


Figura 2: Primer Sistema de Parada OPAL

- Segundo Sistema de Parada (SSP): Ante alguna anomalía en la caída de barras de control, se activa el Segundo Sistema de Parada. Este sistema consiste en la apertura de un tren de válvulas que permiten el vaciado de, aproximadamente, la mitad del material reflector ( $D_2O$ ) contenido en el Tanque Reflector. La ausencia de reflector afecta directamente la producción de neutrones térmicos y por ende detiene la reacción en cadena. El proceso completo de vaciado del tanque se produce en menos de 30 segundos. La Figura 3 muestra un esquema del Segundo Sistema de Parada, que incluye al Tanque Reflector, seis electroválvulas y un tanque de almacenamiento que recibe el agua pesada.

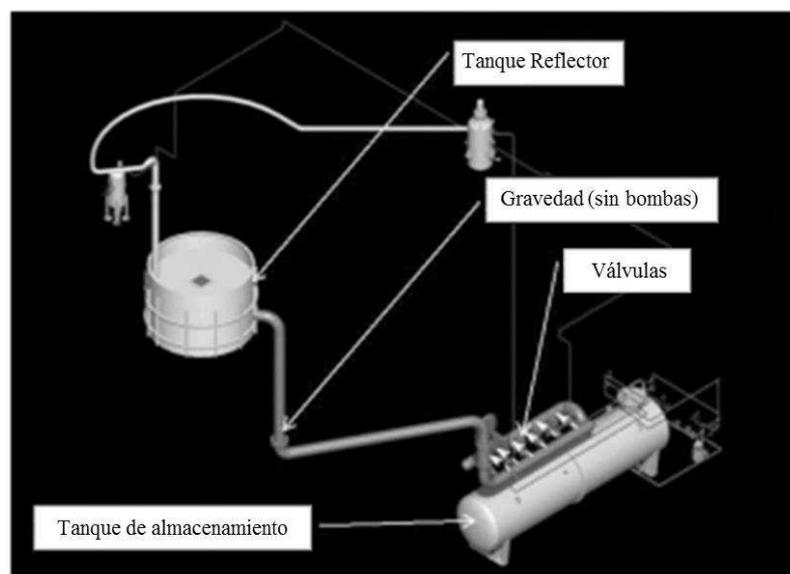


Figura 3: Segundo Sistema de Parada OPAL

El tiempo, al igual que la forma de la curva de drenaje del TR en el SSP, es muy importante para determinar cuál es el comportamiento de apagado del reactor. Con el fin de garantizar la viabilidad y función del SSP, INVAP construyó un modelo físico a escala 1:1 para realizar las mediciones de tiempo de descarga correspondientes y la curva de descenso de nivel. La Figura 4 muestra fotos del modelo físico construido por INVAP.

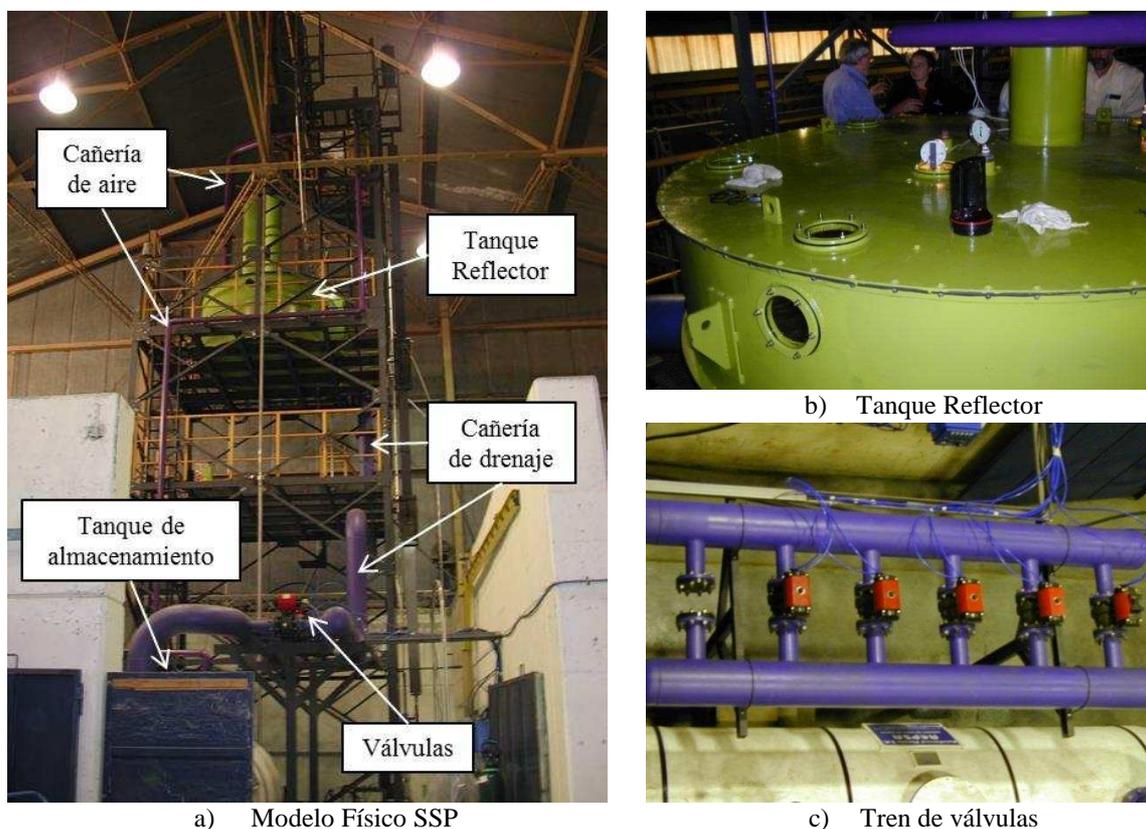


Figura 4: Modelo Físico a escala 1:1

El modelado computacional mediante análisis de mecánica de fluidos (CFD), permite obtener la curva de vaciado del tanque sin la necesidad de construir modelos físicos con los tiempos y costos que los mismos conllevan.

El objetivo de este análisis es utilizar la metodología de simulación CFD para diseños futuros de tanques reflectores y sus sistemas de seguridad asociados, por lo que es necesario contar con un modelo computacional validado que sirva como una herramienta confiable de diseño.

En el presente informe se presenta el desarrollo en ANSYS Fluent v16.2 de un modelo transiente bifásico agua-aire, a fin de predecir la curva de caudal y de nivel dentro del tanque reflector en función del tiempo. Los resultados obtenidos son comparados con mediciones tomadas en el modelo físico construido para tal fin.

El proceso de validación del modelo computacional conlleva además un estudio de independencia de mallado que se presenta también en este trabajo.

## 2 MODELO CFD

### 2.1 Dominio de cálculo

El dominio de cálculo es generado acorde al modelo físico, como se muestra en la Figura 5.

El modelo físico cuenta con una cañería de aire (ver Figura 4) que conecta el tanque reflector con el tanque de almacenamiento. El objetivo de esta cañería es equiparar las presiones en ambos componentes.

En el modelo CFD, el tanque de almacenamiento no se modela, como tampoco se modela la cañería de aire completa. En cambio, se aplican condiciones de presión en las zonas correspondientes y la pérdida de carga producida por la cañería se modela como la pérdida de carga producida en un medio poroso.

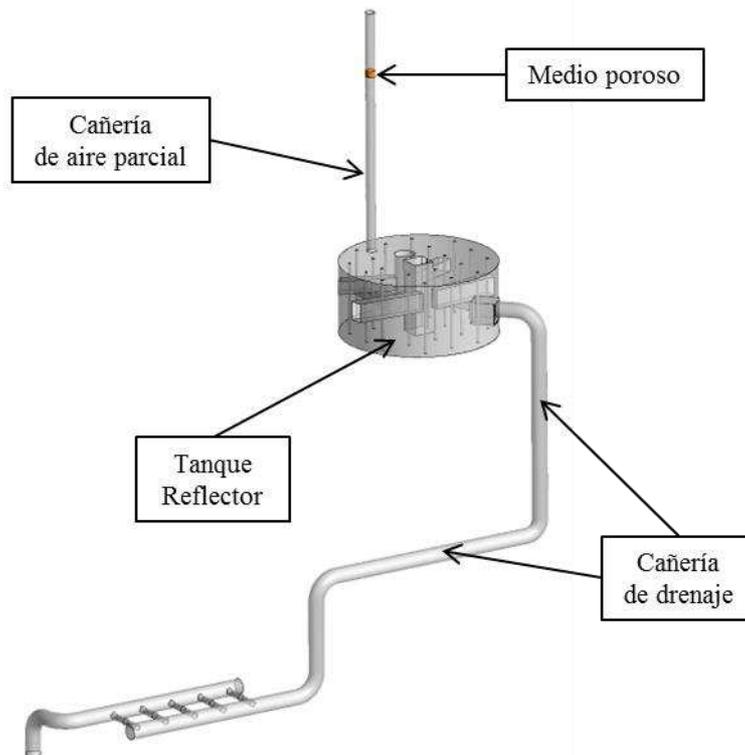


Figura 5: Modelo CFD. Dominio de cálculo

Algunos componentes, como tornillos, soldaduras e internos de las válvulas, no son incluidos considerando que no intervienen en la fenomenología del drenaje del tanque.

## 2.2 Discretización espacial

Las mallas son generadas con el software ANSYS Meshing 16.2 mediante el método de mallado *CutCell*.

Se resuelven cuatro mallados distintos, manteniendo la misma estructura general de la malla y aumentando el nivel de refinamiento de los elementos. En la Tabla 1 se resumen los tamaños de las cuatro mallas.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4
Elementos	1.4	5.2	10.4	20.6
Nodos	1.5	5.4	10.8	21.0

Tabla 1: Tamaño de mallas en millones

En la Figura 6 se muestran la malla más gruesa y la más fina utilizada para el estudio de independencia de malla.

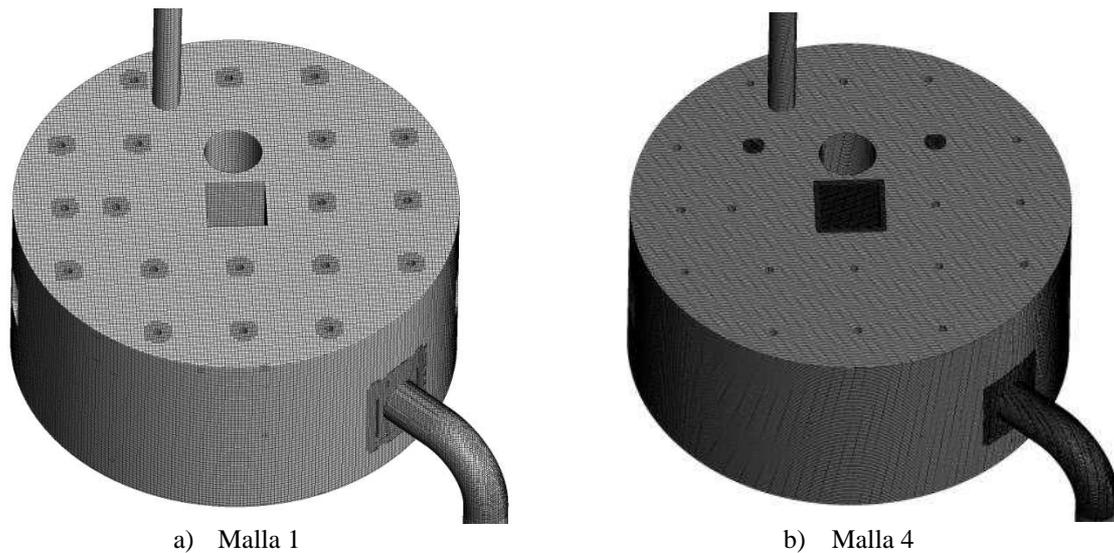


Figura 6: Mallado grueso y fino

### 2.3 Hipótesis de modelado

A continuación se listan las principales hipótesis consideradas para el modelado:

- Simulación en estado Transiente e isotérmico
- Solver: *Pressure-Based*
- Modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Fases:
  - Agua incompresible a condiciones ambiente
  - Aire incompresible a condiciones ambiente
- Modelo viscoso: *K-epsilon Realizable* con funciones de pared *Scalable Wall Functions*
- Esquema de acoplamiento Presión-Velocidad: PISO (*Pressure-Implicit Splitting of Operators*)
- Método de interpolación para presión: PRESTO! (*PREssure STaggering Option*)
- Paso de tiempo: Adaptativo:
  - Número global de *Courant* máximo: 0.5
  - Paso de tiempo mínimo: 1E-5 s
- Tiempo de simulación: 23 s

### 2.4 Condiciones de contorno e inicialización

En la cara superior de la cañería de aire, al igual que en la salida de la cañería de drenaje aguas abajo de las válvulas, se fija la misma condición de presión estática. Esta condición existe en el modelo físico mediante la conexión del tanque reflector con el tanque de almacenamiento para equalizar las presiones.

Todas las paredes son modeladas como paredes sin deslizamiento.

Inicialmente, el tanque está lleno de agua, la cañería de aire tiene agua hasta un cierto nivel y la cañería de drenaje está llena de agua hasta la zona del tren de válvulas. Al iniciar la simulación, el tanque se drena por fuerza gravitatoria a través de la cañería de drenaje. Ver Figura 7.

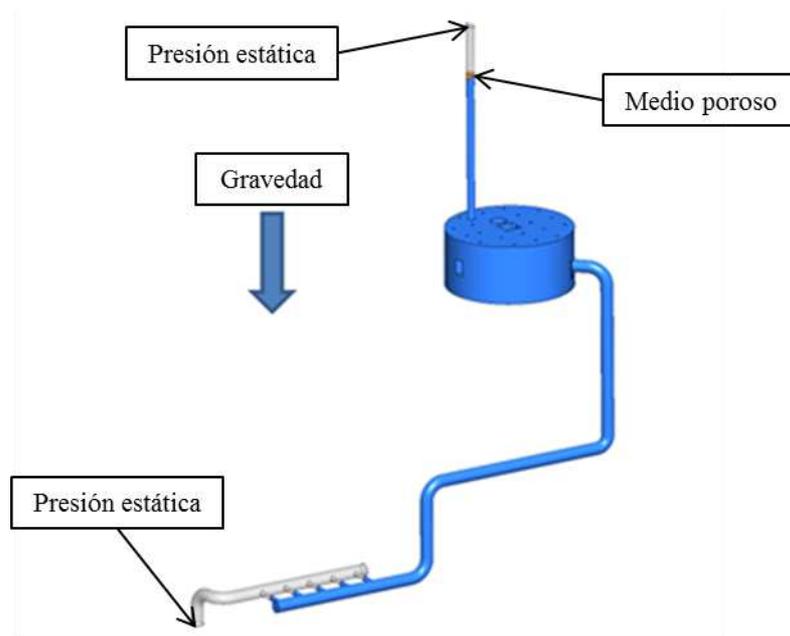


Figura 7: Condiciones de contorno e inicialización

En el modelo físico, la cañería de aire tiene una serie de tramos y codos que no son considerados en el dominio de cálculo. Sin embargo, la pérdida de carga generada por estas particularidades geométricas provoca un retardo en el ingreso de aire al TR y por ende afecta el comportamiento de vaciado del tanque. Se aplica en el modelo CFD una resistencia al pasaje de aire mediante una zona porosa con una función potencial con la siguiente expresión:

$$S = -C_0|V|^{C_1} \quad (1)$$

Donde,  $S$  es el término fuente,  $C_0$  y  $C_1$  son coeficientes empíricos y  $|V|$  es la magnitud de la velocidad. Los coeficientes  $C_0$  y  $C_1$  se obtienen a partir de un cálculo unidimensional de la cañería de aire completa. No se espera presencia de agua en la zona porosa, por lo que el término fuente se aplica solo a la fase aire.

### 3 RESULTADOS

Las mediciones de nivel de agua en el tanque son tomadas de forma análoga a como fueron medidas en los ensayos experimentales.

El modelo físico cuenta con una cinta con una escala delimitada cada 10 cm ubicada en la zona central del TR, en una de las paredes de la estructura que rodea al núcleo. En el modelo CFD se toman los valores de nivel en la misma posición espacial del tanque. En la Figura 8 se muestra una foto de la medición de nivel durante uno de los ensayos físicos y un esquema de la posición de medición en el modelo CFD.

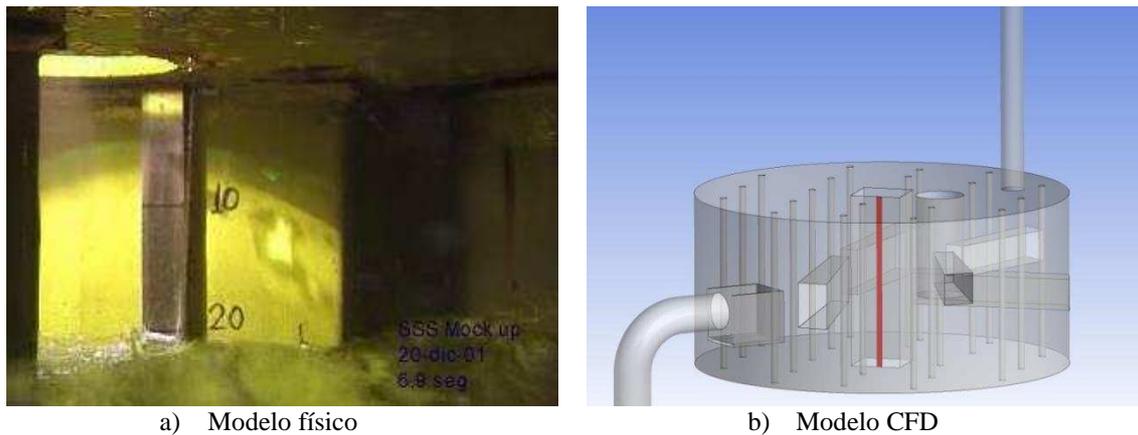


Figura 8: Posiciones de medición de nivel de agua en el tanque

Las curvas de nivel son normalizadas de modo tal que el nivel máximo de agua en el tanque corresponde al valor unitario y el nivel mínimo a 0. El mínimo nivel de agua en el tanque es determinado por la caja de succión de la cañería de drenaje. Ver Figura 9.

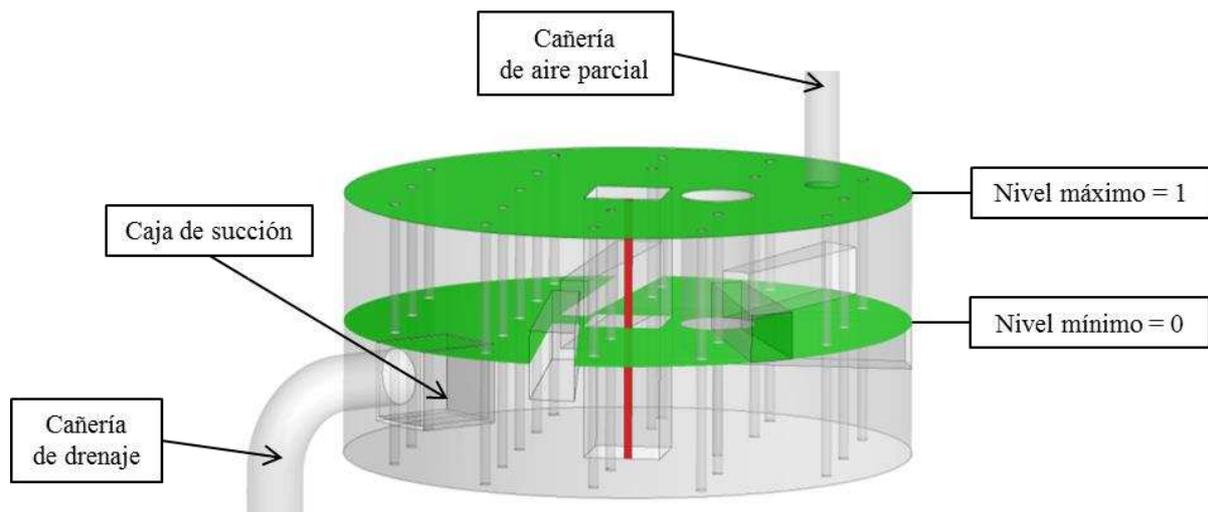


Figura 9: Nivel superior e inferior de agua en el TR

### 3.1 Análisis de independencia de malla

Para el análisis de independencia de malla se resolvieron los cuatro mallados de la Tabla 1 limitando la simulación a los primeros 10 segundos de drenaje del tanque.

Las simulaciones con las mallas 1 y 2 fueron resueltas con recursos propios de INVAP, utilizando 32/64 cores Intel® Xeon® E5-2620.

Las simulaciones con las mallas más finas (malla 3 y 4) fueron resueltas en el cluster TUPAC (<http://tupac.conicet.gov.ar/>), utilizando 1056 cores AMD Opteron Serie 6200.

La Figura 10 muestra los resultados de nivel de agua en el tanque obtenidos para las cuatro mallas.

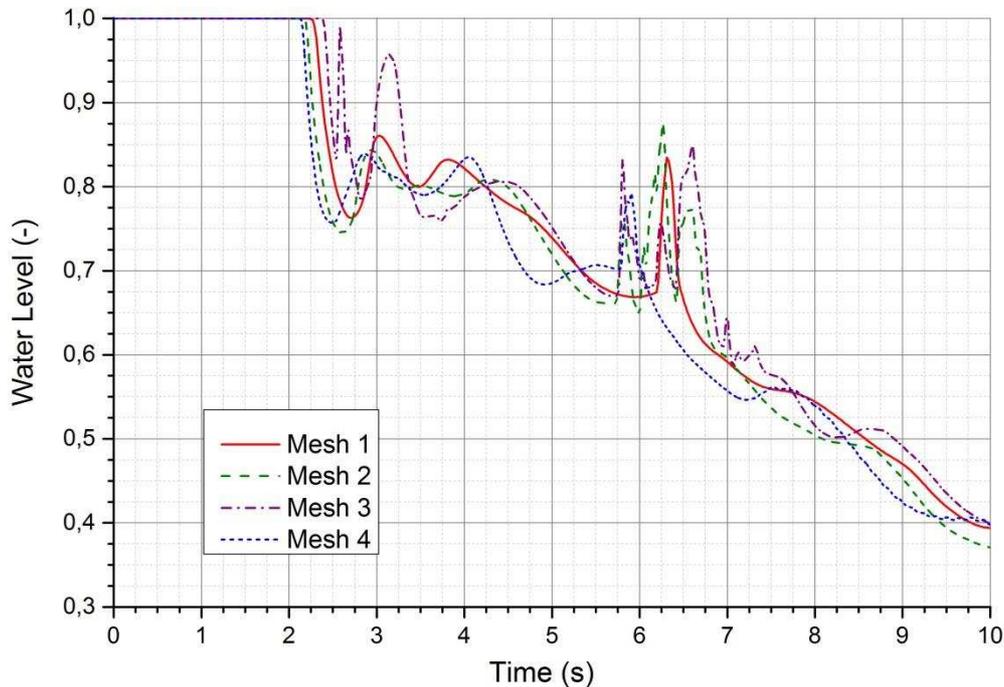


Figura 10: Análisis de independencia de malla

En los primeros 2 segundos el nivel de agua en el tanque se mantiene en su nivel máximo. Este comportamiento se debe al tiempo necesario para que se produzca el vaciado del agua dentro de la cañería de aire. Inmediatamente después comienza el ingreso de aire en el tanque.

Durante la primera etapa de cambio de nivel de agua en el tanque aparece un fenómeno bien marcado de fuerte oleaje o *sloshing*, que se mantiene aproximadamente desde los 2 segundos posteriores a la apertura de las válvulas hasta los 7 segundos. El fenómeno de *sloshing* modelado mediante el modelo multifásico VOF es fuertemente dependiente de la resolución de la malla, razón por la cual se observa en la Figura 10 una mayor dispersión de los resultados en esta zona.

Luego de los 7 segundos, la caída de nivel en el tanque se produce en forma suave, sólo se observa un leve oleaje en la superficie libre de agua. En esta zona la dispersión en los resultados para las 4 mallas se encuentra en el orden del 3-4%.

A los fines de evaluar el descenso de nivel de agua en el tanque la evolución es independiente de la malla adoptada. Sin embargo, para un análisis multifásico 3D (acoplamiento neutrónico – distribución espacial del reflector) es necesario el mallado más fino para capturar las oscilaciones de nivel dentro del tanque reflector.

### 3.2 Vaciado del Tanque Reflector

La Figura 11 muestra la curva completa de cambio de nivel de agua dentro del TR correspondiente a 23 segundos de simulación con la malla más fina, malla 4. Sobre la curva se superponen los resultados de las mediciones experimentales tomadas durante los ensayos en el modelo físico.

Se distinguen cuatro etapas particulares del vaciado del tanque:

- 0 – 2 segundos: no hay cambios en el nivel de agua debido al tiempo requerido para el vaciado de la cañería de aire.
- 2 – 7 segundos: cambios grandes en medición de nivel debido a fuerte *sloshing*.

- 7 – 11 segundos: Caída de nivel de agua en forma suave y lineal con oleaje suave.
- 11 – 23 segundos: En el orden de los 11 segundos posteriores al accionamiento del SSP, comienza a ingresar aire en la cañería de drenaje. En ese instante se produce un cambio en la pendiente de la curva de nivel y se pierde el comportamiento lineal de vaciado. El nivel cae de forma cada vez más lenta hasta que alcanza su mínimo valor aproximadamente a los 23 segundos.

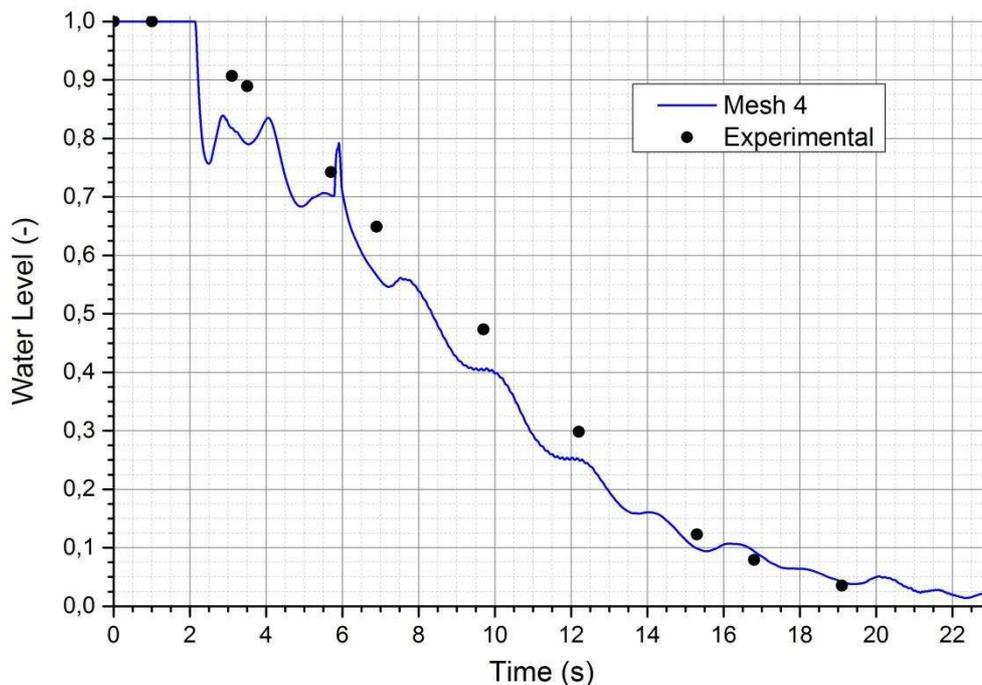


Figura 11: Nivel de agua en el TR

La simulación representa de forma aceptable las mediciones tomadas experimentalmente en el modelo físico. Las diferencias observadas en la Figura 11 caen dentro del 10% de error informado en la lectura de nivel de los ensayos físicos.

En la Figura 12 se muestra una iso-superficie que demarca la superficie libre agua-aire para distintos instantes de tiempo. En dicha figura se pueden observar las distintas etapas enunciadas anteriormente.

En la Figura 13 se muestra, para distintos instantes de tiempo, un plano en la zona de conexión del tanque con la cañería de drenaje, coloreado con la fracción másica de agua (1, azul; 0, gris). Se muestra también la misma iso-superficie de la Figura 12.

La resolución de la malla más fina, malla 4, es capaz de captar incluso pequeñas burbujas de aire que aparecen durante el vaciado.

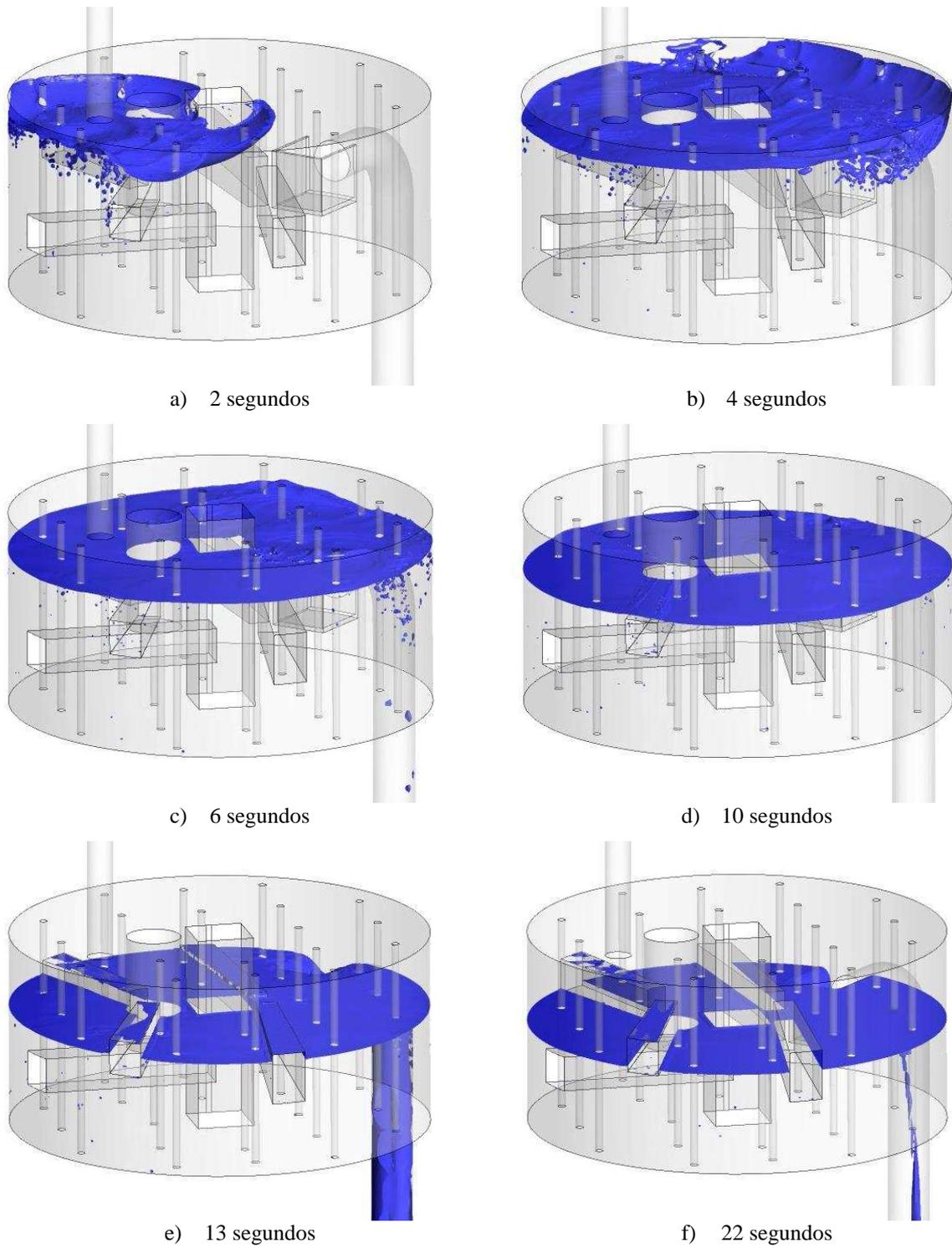


Figura 12: Superficie libre. Evolución en el tiempo

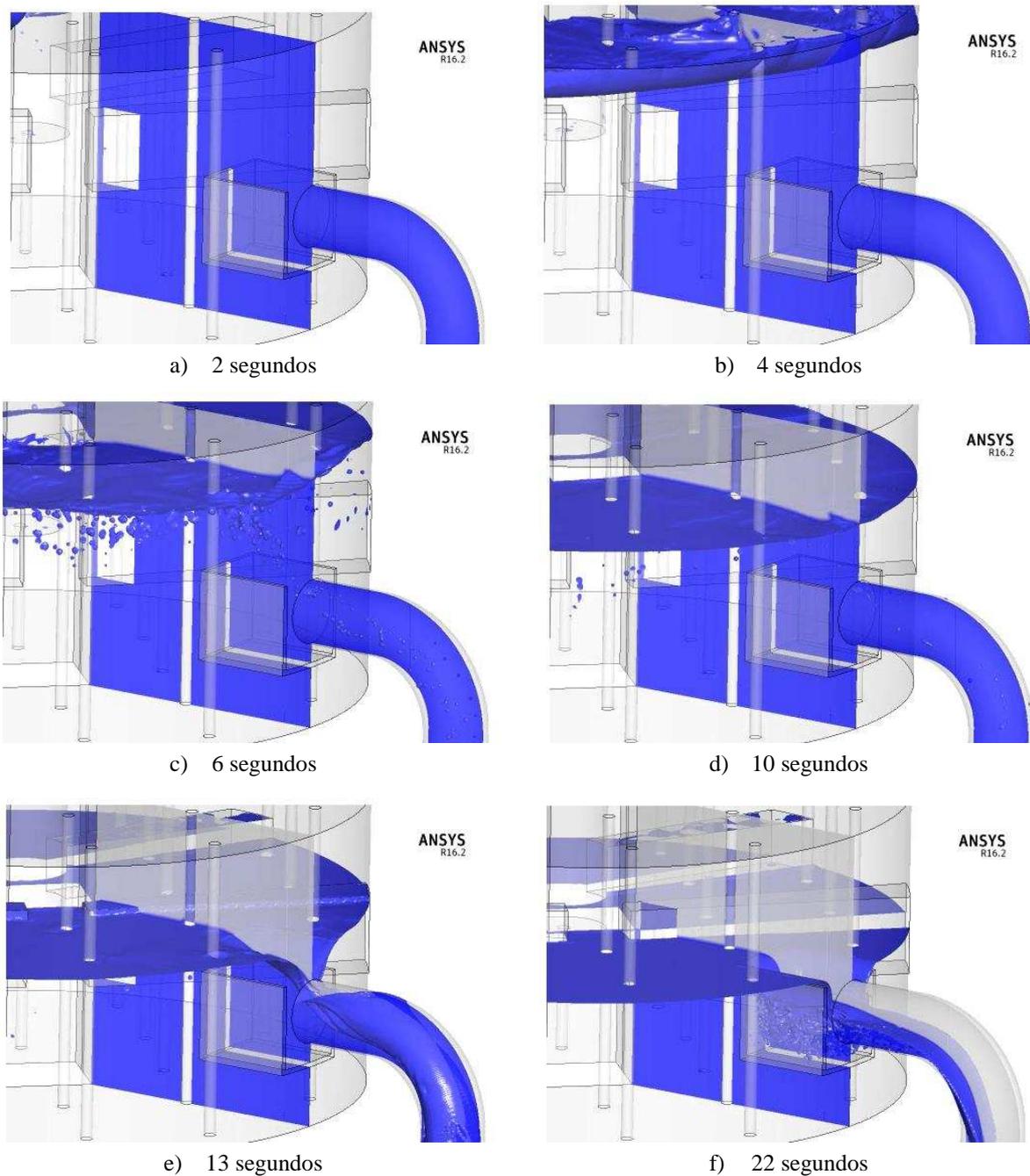
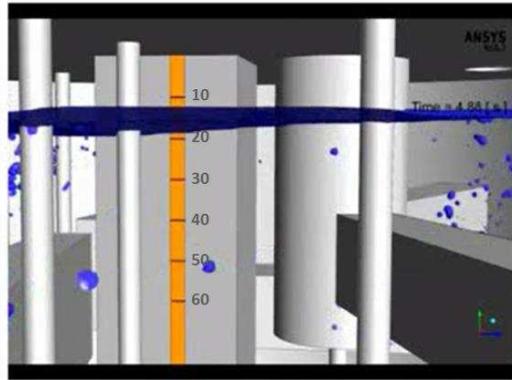
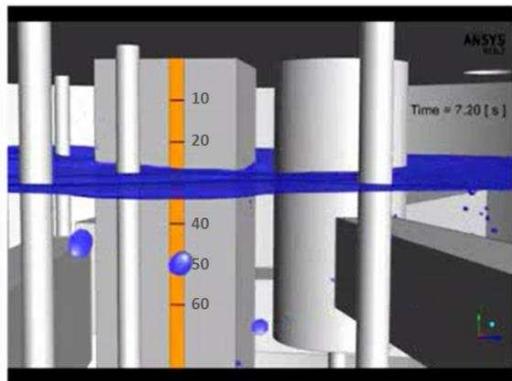


Figura 13: Superficie libre en caja de succión

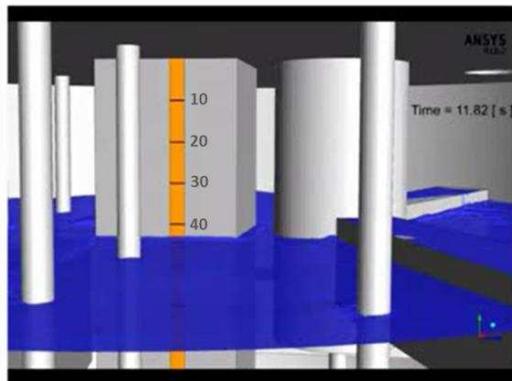
En la Figura 14 se muestra una comparación de imágenes tomadas en uno de los ensayos experimentales con resultados de la simulación CFD para el mismo instante de tiempo. Las escalas de nivel muestran una muy buena correlación entre los resultados obtenidos en el modelo físico y el modelo computacional.



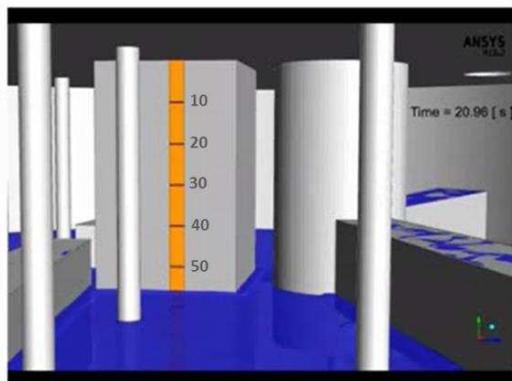
a) 4.9 segundos



b) 7.2 segundos



c) 11.8 segundos



d) 21.0 segundos

Figura 14: Comparación en el tiempo. Modelo físico Vs. Modelo CFD

En la Figura 15 se muestra la evolución en el tiempo del caudal másico total, el de agua y el de aire medidos en la cañería de drenaje, en una posición próxima y aguas abajo del primer codo de 90°.

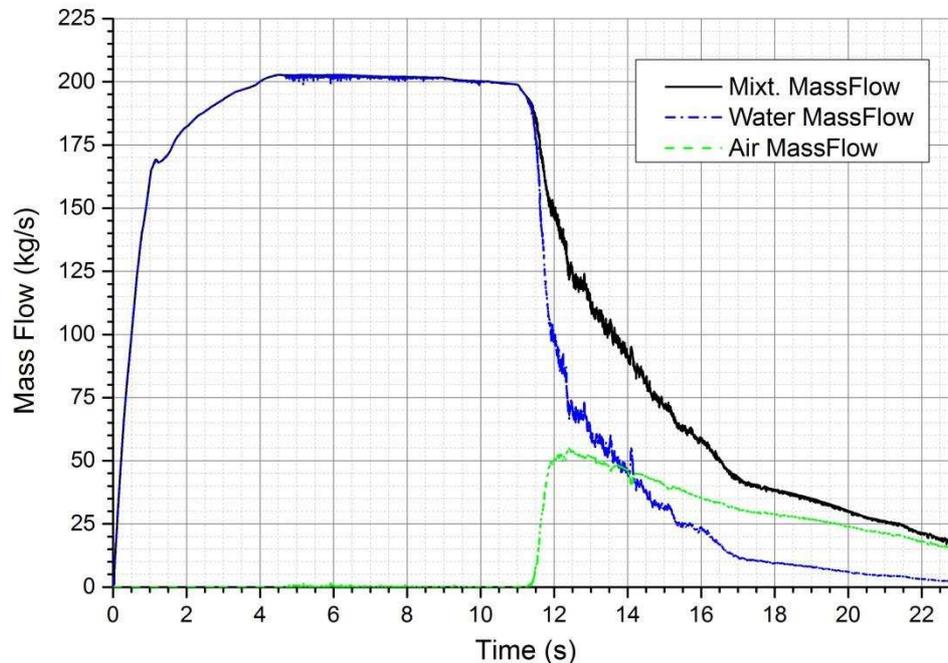


Figura 15: Caudal másico

Se observa en la figura que el caudal de agua alcanza un máximo aproximado de 200 kg/s (730 m<sup>3</sup>/h), y luego se mantiene estable hasta la aparición de aire alrededor de 11 segundos después del inicio del drenaje del tanque. En este punto el caudal cae abruptamente, lo cual explica el cambio en la pendiente de nivel de la Figura 11.

Por completitud, se muestra en la Figura 16 la curva de tiempo de ejecución vs tiempo simulado para el caso de la malla 4, corrido en el cluster TUPAC.

Para este caso se utilizó procesamiento en paralelo de 1056 cores y un aproximado de 700 GB de memoria RAM. Bajo estas condiciones el análisis completo fue resuelto en un tiempo neto de ejecución de 788 horas y 30 minutos, lo que resulta en aproximadamente 33 días de corrida.

En la figura es claro un cambio brusco de pendiente en el segundo 11. Este cambio se debe a que el algoritmo de resolución cuenta con un paso de tiempo variable para mantener el número de *Courant* máximo bajo un cierto límite preestablecido. El paso de tiempo se adapta en función del mezclado que existe entre las fases y las velocidades involucradas. La simulación muestra una significativa reducción del paso de tiempo alrededor de los 11 segundos, alcanzando su valor mínimo de 1E-5 segundos. Este cambio corresponde al momento en donde comienza a ingresar aire en la cañería de drenaje.

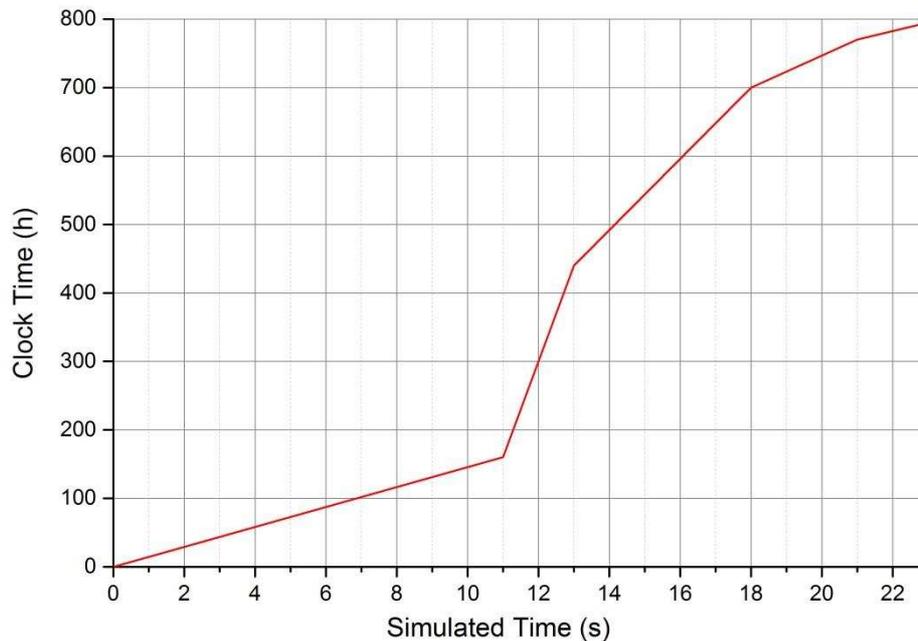


Figura 16: Malla 4. Tiempo de cálculo TUPAC

#### 4 CONCLUSIONES

Con el objetivo de contar con una representación validada y confiable del drenaje del tanque reflector del reactor OPAL, como parte del Segundo Sistema de Parada, se generó un modelo CFD, transitorio multifásico con interfaz aire-agua mediante ANSYS Fluent v16.2.

Dentro del proceso de validación del modelo computacional, se realizó un análisis de convergencia de malla y una comparación de resultados de nivel de agua con mediciones en el modelo físico construido para tal fin.

El análisis de convergencia de malla fue realizado utilizando 4 mallados de diferente nivel de refinamiento. De este análisis se concluye que el comportamiento **global** del drenaje del tanque es independiente de las mallas estudiadas. La dispersión de los resultados en todos los casos es menor al 4% en la etapa de vaciado suave. Aunque existan diferencias mayores en la etapa de *sloshing*, estas diferencias no afectan el comportamiento general de drenaje del tanque.

La simulación completa del vaciado del tanque se torna muy demandante computacionalmente a causa del requerimiento de mantener números de *Courant* bajos. Debido a la definición del número de *Courant*, la demanda de tiempos de cálculo y recursos computacionales crece exponencialmente a medida que se reduce el tamaño de los elementos de malla.

La curva completa de variación de nivel de agua en el tanque obtenida mediante CFD muestra una correlación aceptable con las mediciones tomadas en campo. Las diferencias son menores al 10% de error informado por la metodología de medición experimental empleada.

El modelo CFD utilizado en este análisis se considera validado para aplicaciones futuras, incluso con los mallados más gruesos.

#### 5 PRÓXIMOS PASOS Y ESTRATEGIAS A FUTURO

El contar con un modelo hidráulico del drenaje del tanque reflector de OPAL validado, permitirá a INVAP hacer uso del mismo para diseños futuros de tanques reflectores y sus

sistemas de seguridad asociados, sin la necesidad de construir nuevos modelos físicos.

Por otro lado, considerando las capacidades de INVAP y los avances en la capacidad de análisis y poder de cálculo, se trabajará en la integración del análisis hidráulico CFD con análisis neutrónicos mediante MonteCarlo y datos experimentales, con el objetivo de contar con un modelo multifísica del Segundo Sistema de Parada.

## **AGRADECIMIENTOS**

Las simulaciones en el cluster TUPAC fueron realizadas gracias al trabajo en conjunto con Esteban Mocskos y Damian Montaldo de CSC-CONICET (<http://www.csc-conicet.gob.ar/>), Juan Grapsas y Silvina Dengra de Sim&Tec (<http://www.simytec.com/>) y la colaboración y provisión de licencias de ESSS Argentina (<http://www.esss.com.ar/>).