

MODELADO CFD DEL PRECALENTADOR DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA FACILIDAD NUCLEAR RD-14M

Godino Dario^A

^ACIMEC - Centro de Investigación en Métodos Computacionales, UNL, CONICET, FICH

Área: Ingeniería

Sub-Área: Otras ingenierías y tecnologías

Grupo: Y

Palabras clave: Transferencia de energía, CFD, coeficiente de transferencia térmica.

INTRODUCCIÓN

La transferencia de energía fluido-sólido es un fenómeno de gran importancia por sus numerosas aplicaciones industriales. La totalidad de los procesos térmicos destinados a la producción de energía, como por ejemplo plantas térmicas de ciclo combinado o de energía nuclear, hacen uso de equipos de alta transferencia de calor.

Mediante la implementación de la mecánica de fluidos computacional (CFD) es posible abordar estos problemas de transferencia de energía con un nuevo enfoque, logrando una mayor comprensión del comportamiento de los fluidos y del transporte de energía. Pese a las limitaciones que aún tiene, esta herramienta es de gran importancia para el diseño de equipos más eficientes, como así también, para su empleo como un laboratorio virtual en la simulación de experimentos que permitan definir nuevas correlaciones o ampliar el rango de aplicabilidad de las ya conocidas.

En este marco, se analizó la transferencia de energía utilizando modelos conjugados (fluido-sólido) **Sjolinder (2012)** para estudiar el pre-calentador (PH) perteneciente al generador de vapor (GV) de la facilidad nuclear RD-14M. Este PH es básicamente un intercambiador de calor de casco y tubos (ICCT), que se diferencia de los convencionales (ICC) por estar integrado al GV.

Los GV pertenecientes a las centrales nucleares son generalmente similares, y consisten en miles de tubos en U por donde circula el refrigerante del circuito primario, transfiriendo energía al circuito secundario. En este último se produce el vapor que alimenta las turbinas.

La **Figura 1** muestra esquemáticamente los distintos componentes del GV. Su *riser* consiste en un cuerpo vertical cilíndrico, el cual está dividido en dos ramas mediante un *baffle* central. Por una de estas ramas circula el agua de re-circulación, que retorna por el *downcomer* (conducto externo). Por la otra rama circula el agua de alimentación, la cual ingresa primero al PH, y luego de calentarse hasta la saturación, se mezcla con el agua de recirculación a

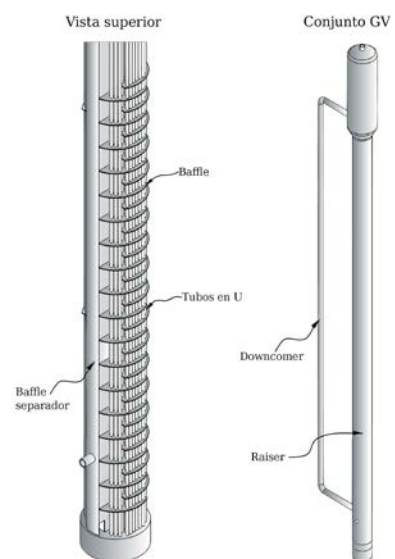


Figura 1: Precalentador y GV completo del RD-14M

través de aberturas (ecualizadores) dispuestos sobre el baffle central. Debido a este diseño integrado en el GV, el PH no presenta la forma cilíndrica característica de los ICC, lo cual hace necesario adaptar las correlaciones empíricas disponibles.

Entonces para caracterizar el PH se requiere conocer parámetros como el coeficiente global de transferencia térmica (CGTT) y la pérdida de carga tanto en el primario como en el secundario. Esto conduce a diferentes enfoques: en el interior de los tubos el análisis puede basarse en las correlaciones empíricas de Ditus-Bolter.

En cambio, para el flujo en el secundario el estudio se vuelve más complejo, principalmente atendiendo a las diferentes trayectorias del flujo, corrientes de derivación y de fuga. Las correlaciones empíricas más utilizadas para analizar el secundario o lado coraza, son los métodos Kern y de Bell-Delaware (**Eduardo Cao**). El primero de ambos da resultados más conservadores, siendo solo adecuado para análisis preliminares. Por otro lado, el método de Bell-Delaware incorpora un análisis más detallado de las diferentes corrientes que intervienen en la coraza, obteniendo estimaciones más precisas.

Ahora, si se utiliza CFD, este permite cuantificar los parámetros característicos de los ICCT así como también identificar efectos locales.

OBJETIVOS

- Simular mediante CFD la geometría real del PH utilizando un algoritmo computacional que resuelva el acoplamiento térmico
- Evaluar los coeficientes de transferencia térmica y las pérdidas de presión para ambos circuitos.
- Comparar los resultados obtenidos con las correlaciones empíricas.
- Realizar un análisis cualitativo del flujo en el circuito secundario.

METODOLOGÍA

Debido a la gran cantidad de pasos que presenta el PH, se optó por realizar un modelo parcial considerando solo 2 de los 26 pasos que lo componen. Esto permitió refinar la grilla y obtener resultados con un elevado nivel de detalle.

La transferencia de calor entre el lado tubo y el lado coraza se resolvió de forma acoplada utilizando el solver *CHTMultiRegionSimpleFoam* (*Conjugate Heat Transfer*) de la librería *OpenFOAM®*, el cual emplea un método iterativo para resolver las múltiples regiones, tanto sólidas como líquidas.

Modelo geométrico y discretizado

La geometría del pre-calentador es mostrada en la **Figura 2**. PH. El modelo computacional se compone de tres regiones:

- Circuito primario: Contiene el mazo de 44 tubos de diámetro interior 13.62 (mm), por donde circula un caudal total de 24 (kg/s) de agua a 10 (MPa) y a una temperatura cercana a la saturación. Dado que el PH está en la parte inferior del GV, los tubos en el modelo fueron extendidos aguas arriba la suficiente para garantizar que el flujo

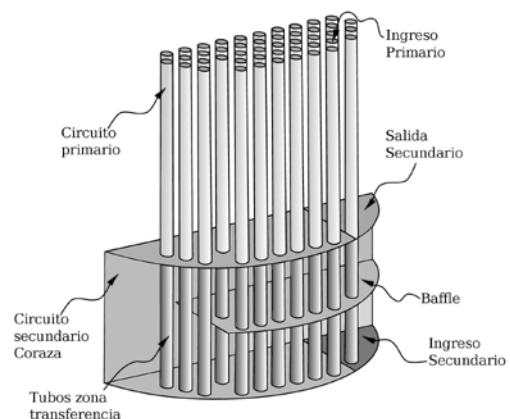


Figura 2: Modelo geométrico

- esté completamente desarrollado antes de ingresar a la zona de intercambio.
- Circuito secundario: Consiste en la coraza del PH, y se encuentra formada por dos zonas divididas mediante un baffle separador. Esta región se denomina secundario y recibe un caudal de 2 (kg/s) de agua liviana a una presión de 4.5 MPa y una temperatura de 187 (°C)
- La tercera región es la pared sólida de los tubos (el baffle no tiene espesor), donde se produce la transferencia térmica entre los dos circuitos de agua. El material de los tubos es Incoloy-800 ($k = 16.3 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$).

La geometría fue discretizada utilizando mallas estructuradas (Figura 3). Se empleó para la malla de superficie un total 2,175,036 de elementos triangulares y cuadriláteros. La malla de volumen se construyó con elementos pentaedros y hexaedros, con un total de 39,665,600 de elementos. Se observa el elevado refinamiento que se realizó tanto hacia afuera como hacia adentro de los tubos para simular correctamente la transferencia de calor en las paredes del mismo.

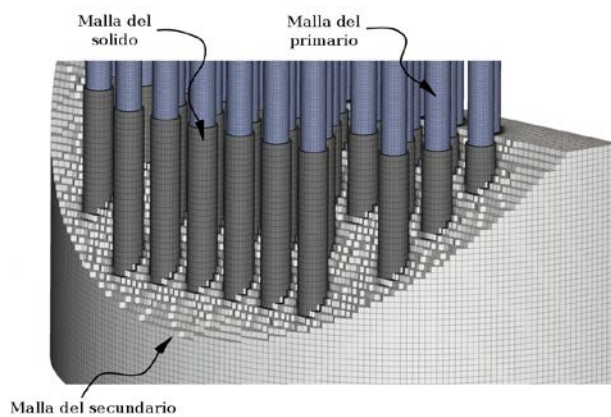


Figura 3: Modelo mallaado

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación en estado estacionario del modelo CFD, y se los compara con las correlaciones empíricas anteriormente mencionadas. Se realiza una descripción exhaustiva de la pérdida de carga, los coeficientes de transferencia térmica y la distribución de velocidad en las diferentes regiones, poniendo especial énfasis en la región secundaria.

Coefficiente de transferencia térmica

Inicialmente se caracterizó el CGTT. Para ello se evaluaron los CTT de cada circuito y posteriormente se obtuvo el coeficiente global de transferencia

La **Tabla 1** compara los CTT obtenidos mediante los diferentes métodos. Se observa que el modelo de Kern presenta una diferencia con respecto al modelo de Bell-Delaware de 7.62%. En cambio, para CFD esta diferencia alcanza 27.4%, lo cual se refleja en un mayor flujo de calor transferido. Esto se puede interpretar de dos formas, o bien el CFD sobre estima la transferencia de calor, o al considerar en detalle los flujos que circulan por ambos circuitos logra capturar mejor los fenómenos, obteniendo resultados menos conservadores.

Métodos de análisis	Flujo de calor total (W)	Coeficiente de transferencia térmica			Coeficiente global diferencia % respecto a Bell-Delaware
		Lado primario (W/m ² K)	Lado secundario (W/m ² K)	Coeficiente global (W/m ² K)	
CFD	191235	42953	11126	5934	27.4
Bell-Delaware	149330	35091	7886	4657	-
Kern	137960	35091	6920	4302	7.62

Tabla 1: Coeficiente de transferencia

Pérdida de presión en el primario y secundario

Este es un aspecto de suma importancia en la eficiencia de estos equipos, debido a la necesidad de equilibrar la potencia necesaria para que garantice una elevada velocidad de flujo que circula a través de los baffles, con el costo de suministrar esta energía. De la **Tabla 2** se observa que, en el circuito primario las diferencias obtenidas son menores al 0.5% para el CFD. Este grado de precisión es esperable en vista de que la pérdida de carga en el interior de un tubo con flujo completamente desarrollado no presenta complejidad.

Métodos de análisis	Pérdida de carga en secundario (Pa)				Pérdida de carga en primario (Pa)	
	En baffle	Flujo cruzado	Total	Diferencia %	En tubos	Diferencia %
CFD	776.5	2278.7	3055.2	30.63	1457.6	0.3
Bell-Delaware	395.3	1943.5	2338.8	-	1462	-

Tabla 2: Perdida de presión en el primario v secundario

Líneas de corriente y velocidad en la proximidad de los tubos

Se completa el análisis cuantitativo del PH con un estudio cualitativo de las líneas de corriente y la distribución de velocidad en las proximidades de los tubos. Se observa de la **Figura 4 a)** una zona de baja velocidad en el ingreso, que ocasiona turbulencia en la entrada del secundario. Del mismo modo, se puede observar en el sector donde el fluido cambia de sentido, que se desprende del baffle, y se proyecta sobre la parte superior del equipo, ocasionando altas velocidades.

Otro aspecto muy importante de estos equipos es el espaciamiento del baffle. Esto ya fue estudiado por **Ozden, Ender y col (2010)**, en donde se analizaba una distancia y un corte óptimo para el baffle. Para este caso se puede observar que ambos parámetros son adecuados, puesto que no se produce recirculación cuando el fluido cambia de sentido, como tampoco zonas donde los tubos se encuentren fuera del alcance de la corriente principal. Por último se observa en **Figura 4 b)**, el campo de velocidad en las proximidades de los tubos. Este parámetro permite anticipar la relación entre el flujo de calor y la velocidad en las proximidades de los tubos, siendo mayor el flujo a velocidades mas elevadas.

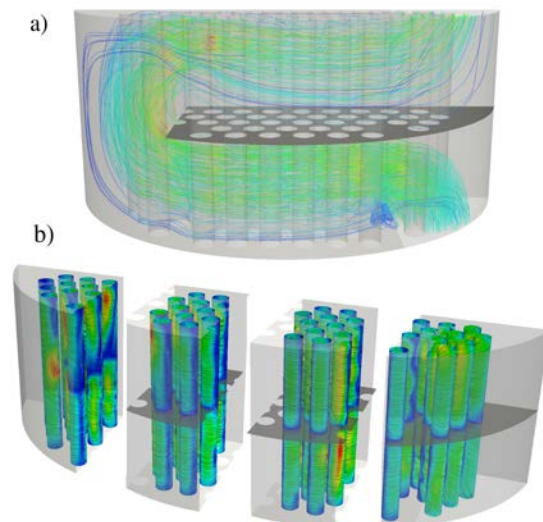


Figura 4: a) Líneas de corriente y b) Velocidad sobre los tubos

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Sjölander, E., 2012. Spray and Wall Film Modeling with Conjugate Heat Transfer in OpenFOAM.

Ozden, E., & Tari, I., 2010. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 1004-1014.

Eduardo Cao, 2004. Transferencia de calor en ingeniería de procesos.