

## INTERFAZ FLUIDO-GAS EN REACTORES DE SODIO DE IV GENERACIÓN

### FLUID-GAS INTERFACE IN IV GENERATION SODIUM REACTORS

I. Pérez Correa<sup>a,b</sup>, A. Salemme<sup>b</sup>, M. Chocrón<sup>b,c</sup> y S. Labollita<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Tecnologías de Hidrógeno y Energías Sostenibles (ITHES) - (CONICET-UBA),  
Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, CABA, Argentina,  
igperez@fi.uba.ar, <https://ithes-uba.conicet.gov.ar>*

<sup>b</sup>*Facultad de Ingeniería - Sede Ciudad Universitaria, Universidad de Buenos Aires,  
Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, CABA, Argentina,  
ailensalemme@gmail.com, dmp.labollita@gmail.com, <http://www.fi.uba.ar>*

<sup>c</sup>*Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica,  
Av. General Paz 1499, San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina,  
chocron@cnea.gov.ar, <https://www.argentina.gob.ar/cnea>*

**Palabras clave:** Reactores rápidos de sodio, Fenómenos de transporte, Radiación térmica.

**Resumen.** Los reactores nucleares de IV generación fueron concebidos con el objetivo de implementar mejoras en términos de sostenibilidad, seguridad y costo. De las tecnologías evaluadas en la actualidad, las que utilizan sodio líquido a alta temperatura (500°C) como refrigerante se encuentran más avanzadas y cabe destacar que ya existen centrales construidas de potencia elevada. El recipiente del reactor requiere que exista un espacio libre de gas (*plenum*) para absorber fluctuaciones de nivel y para ello se utiliza gas argón que circula en régimen laminar. En la interfaz líquido-gas, los fenómenos de transferencia de calor y masa se verán aumentados por las condiciones de alta temperatura. También se vuelve relevante la cantidad de sodio que se transferirá del líquido al gas por evaporación. De la resolución de las ecuaciones de transferencia se obtuvo que el calor de pérdidas representa un  $4,8 \cdot 10^{-4}$  % de la potencia transmitida y la masa de sodio anual evaporada es de 200 g ( $4,7 \cdot 10^{-3}$  % del contenido del recipiente), valores factibles para el diseño del reactor.

**Keywords:** Sodium fast reactors, Transport phenomena, Thermal radiation.

**Abstract.** Generation IV nuclear reactors were conceived with the purpose of implementing improvements in terms of sustainability, safety and cost. Of the technologies currently being evaluated, those using high-temperature liquid sodium (500°C) as coolant are the most advanced, and it is worth noting that high-power plants have already been built. The reactor vessel requires a free gas space (*plenum*) to absorb volume fluctuations, argon gas circulating in a laminar regime is used for this purpose. At the liquid-gas interface, heat and mass transfer will be enhanced by the high temperature conditions. It is also relevant the amount of sodium that will be transferred from the liquid to the gas by evaporation. It was found from solving the transfer equations that the heat loss is near the  $4,8 \cdot 10^{-4}$  % of the power generated in the reactor core and the annual sodium mass evaporated is almost 200 g ( $4,7 \cdot 10^{-3}$  % of the total sodium mass), which are feasible values for the reactor design.

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético global ha crecido significativamente en los últimos años y se espera que continúe la tendencia alcista creciendo un 50 % hacia el año 2050 (USEIA, 2019). Este incremento en la generación de energía debe hacerse de forma sustentable y sin contribuir al cambio climático, en este sentido, las energías renovables y la energía nuclear presentan características deseables. En particular, las centrales nucleares pueden entregar una potencia constante y regulable por largos períodos de tiempo, lo que es necesario desde el punto de vista de la red eléctrica y esto es algo que las energías renovables aún no han podido conseguir debido a las oscilaciones que se producen en los distintos momentos del día. En la Figura 1 se muestra el factor de capacidad definido como el porcentaje de horas en las que hay generación de energía a máxima potencia.

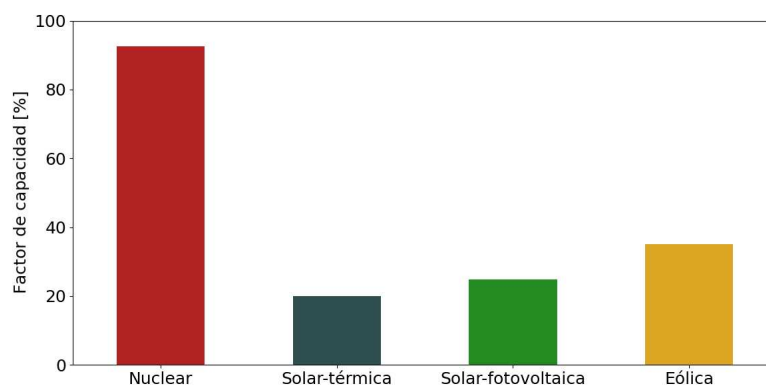


Figura 1: Factor de capacidad según tipo de energía (USEIA, 2021).

Allí se puede ver que las centrales nucleares pueden entregar potencia máxima prácticamente todo el tiempo y las energías renovables no llegan a hacerlo por más de una tercera parte del mismo. De todas maneras, se remarca que es conveniente que las nuevas centrales incluyan también un componente renovable en la generación.

Respecto de la tecnología nuclear, en la actualidad se está desarrollando la IV generación de reactores que se espera que entren en plena operación comercial para el año 2030 (GIF, 2020). Estos tienen como propósito mejorar los diseños anteriores en varios aspectos, entre ellos (Abram y Ion, 2008): Eficiencia en la generación de energía (*mejor utilización del combustible nuclear*), flexibilidad en el aprovechamiento del calor (*uso de energía térmica para aplicaciones secundarias*), creación de material fisible (*reaprovechamiento del combustible nuclear*) y seguridad pasiva (*control autorregulado del calor en caso de apagado de emergencia*). Existen varios tipos de reactores de IV generación en estudio, pero la alternativa que presenta mayor factibilidad en la actualidad es el reactor nuclear rápido de sodio del que ya existen algunos en operación para generación de energía (ver Tabla 1) y otros 13 se encuentran en desarrollo para activarse entre 2023 y 2035 (WNA, 2021).

Desde el punto de vista del esquema de la central (ver Fig. 2) existen numerosas similitudes a los de generaciones anteriores, la principal diferencia radica en que se utiliza sodio líquido a alta temperatura ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) como líquido refrigerante del circuito primario, que posee un punto de ebullición elevado permitiendo una operación a bajas presiones (1 a 10 bar) con respecto a las presiones de los reactores convencionales de agua (120 bar). A su vez, el sodio presenta

Reactor	Tipo	País	Potencia [MW] (Térmica/Eléctrica)	Año de inicio
BN-600	Demostración	Rusia	1470/600	1980
BN-800	Experimental	Rusia	2100/864	2014
FBTR	Experimental	India	40/13	1985
PFBR	Demostración	India	1250/500	2020
CEFR	Experimental	China	65/20	2010
Joyo	Experimental	Japón	140/-	Reinicio 2021

Tabla 1: Reactores nucleares rápidos de sodio existentes actualmente (WNA, 2021).

características adicionales muy ventajosas desde el punto de vista de la transferencia de calor (conductividad térmica elevada y viscosidad similar al agua) lo que radica en diseños termohidráulicos muy favorables.

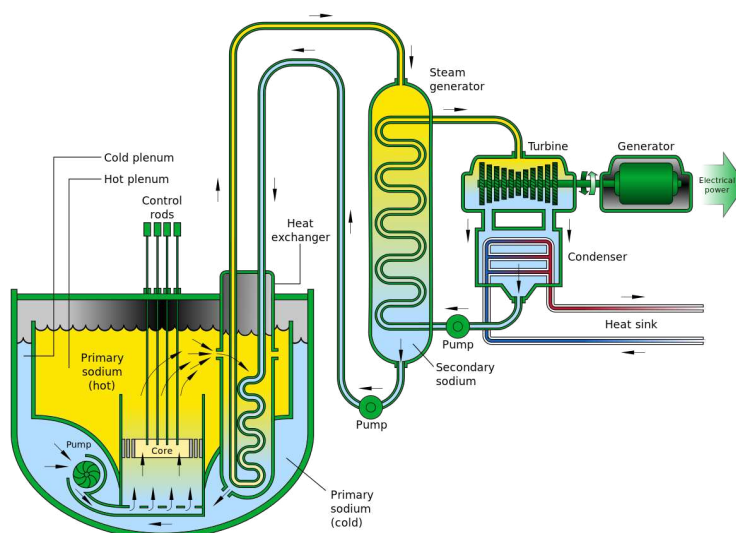


Figura 2: Reactor nuclear rápido de sodio (Abram y Ion, 2008).

Para la operación de estos reactores se requiere que circule una corriente de un gas (por ejemplo, argón) por sobre la masa de sodio para generar una capa inerte entre el líquido y la tapa superior del reactor. Esto se realiza con tres objetivos: remover productos de fisión gaseosos, permitir la existencia de un pulmón para absorber dilataciones y contracciones del fluido refrigerante y, también, para evitar el ingreso de aire (oxígeno) y humedad que se inflaman o generan reacción explosiva con el sodio. Entonces, se modela aquí en forma preliminar, la transferencia de calor y masa a la tapa y al gas de barrido. Para estudiar la transferencia entre el sodio y el flujo de argón, se deben plantear y resolver en simultáneo el balance de cantidad de movimiento, balance de energía y balance de masa parcial para el sodio. El balance de energía debe contener un término asociado a la radiación que se produce por la alta temperatura a la que se encuentra el sodio.

En (Mukhopadhyay et al., 2011) se analiza un fluido contenido entre dos placas paralelas y se estudia la transferencia de cantidad de movimiento y energía con radiación en ella. Al ser un fluido puro no consideran la transferencia de materia, pero se analiza el efecto de la existencia de una velocidad vertical no nula y también que ocurre con el movimiento horizontal de la

placa. Se concluye que el efecto de la velocidad vertical disminuye la temperatura de la fase gaseosa.

El propósito del presente trabajo consiste en resolver los balances de cantidad de movimiento, energía y materia considerando la radiación para determinar los flujos de calor y masa que se emiten desde el reactor con el objetivo de estudiar las pérdidas y analizar la factibilidad del uso del argón como fluido de arrastre.

## 2. DESARROLLO DEL MODELO

En esta sección se describen las ecuaciones necesarias del modelo que permiten estudiar el fenómeno de transferencia en la capa límite de argón sobre la masa líquida de sodio contenida en el recipiente del reactor. El sistema será modelado como una placa plana dónde se desarrolla la capa límite debido al flujo gaseoso de argón en régimen laminar sobre el sodio.

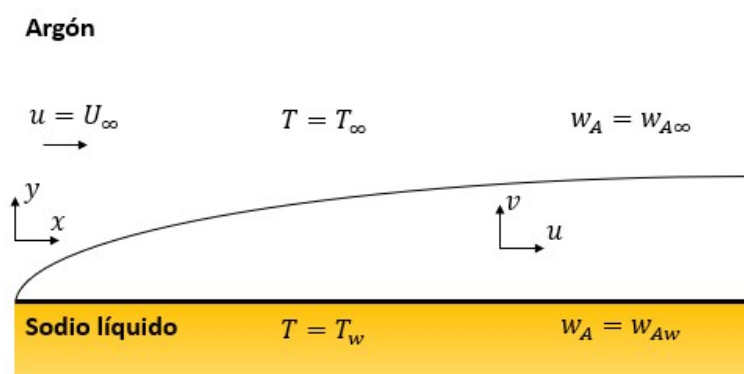


Figura 3: Esquema simplificado de la capa límite.

### 2.1. Ecuación de continuidad y balance de cantidad de movimiento (BCM)

Se comienza con el planteo de la ecuación de continuidad y el balance de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

Con sus correspondientes condiciones de contorno para este sistema:

$$\begin{cases} u(x,y) = 0 & y = 0 \\ v(x,y) = 0 & y = 0 \\ u(x,y) \rightarrow U_\infty & y \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

Se trabajará con el concepto de variable autosimilar en donde se propone una transformación del espacio de variables para que el sistema de ecuaciones pueda ser representado mediante una sola variable ( $\eta$ ) en lugar de las variables geométricas cartesianas ( $x, y$ ). Esto permite trabajar

con ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) en lugar de ecuaciones en derivadas parciales (EDDP). La variable autosimilar que se utiliza para este tipo de sistemas es (White, 2006):

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty}{2\nu x}} \quad (4)$$

Tomando esta definición sumada a la relación que existe entre las velocidades ( $u, v$ ) y la función de corriente ( $\psi$ ):

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

Y utilizando una relación propuesta entre la función de corriente y la variable autosimilar (White, 2006):

$$\psi = \sqrt{2\nu U_\infty x} f(\eta) \quad (6)$$

Es posible demostrar que a partir de la ecuación de continuidad y el balance de cantidad de movimiento puede obtenerse la siguiente ecuación diferencial ordinaria:

$$f''' + ff' = 0 \quad (7)$$

Con sus nuevas condiciones de contorno:

$$\begin{cases} f(\eta) = 0 & \eta = 0 \\ f'(\eta) = 0 & \eta = 0 \\ f'(\eta) \rightarrow 1 & \eta \rightarrow \infty \end{cases} \quad (8)$$

Este balance asume que no existe ningún efecto de la evaporación del sodio en la velocidad vertical del gas en la capa límite, luego se modificará esta condición cuando se introduzca el balance de materia.

## 2.2. Balance de energía con radiación (BE)

A continuación, se tratará el balance de energía en la capa límite considerando el fenómeno de radiación:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial q_{rad}}{\partial y} \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_{(x,y)} = T_w & y = 0 \\ T_{(x,y)} \rightarrow T_\infty & y \rightarrow \infty \end{cases} \quad (10)$$

El estudio de la radiación implica adicionar a la ecuación anterior un balance de radiación (Viskanta y Grosh, 1962) que no es sencillo de resolver, incluso utilizando hipótesis simplificadas. Por ello se decide expresar la radiación mediante la aproximación de Rosseland (Mukhopadhyay et al., 2011) para obtener una solución de la capa límite radiante:

$$q_{rad} = -\frac{4}{3} \frac{1}{k_{abs}} \frac{\partial e_b}{\partial y} \quad (11)$$

Esta ecuación postula que el flujo de calor por radiación es proporcional al gradiente del poder emisivo, siendo  $k_{abs}$  la constante de absorción y  $e_b$  el poder emisivo. Utilizando la ley de

Stefan-Boltzmann ( $e_b = \sigma \epsilon_{Na} T^4$ ) se expresa el flujo radiativo en función de la temperatura de forma explícita:

$$q_{rad} = -\frac{16}{3} \frac{\sigma \epsilon_{Na} T^3}{k_{abs}} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (12)$$

Definiendo una temperatura adimensional ( $\theta = T/T_w$ ) y agregando la dependencia con la variable autosimilar se puede llegar al balance de energía expresado en términos de  $\eta$ :

$$\theta'' + \frac{N_{rad} Pr f \theta' + 3 \theta^2 (\theta')^2}{N_{rad} + \theta^3} = 0 \quad (13)$$

Siendo  $Pr$  el número de Prandtl ( $Pr = \frac{\mu C_p}{k_T}$ ) y  $N_{rad}$  el factor que definimos como el número de radiación que relaciona la transferencia de calor por conducción-convección respecto de la transferencia de calor por radiación:

$$N_{rad} = \frac{k_{T(gas)}}{(16 \sigma \epsilon_{Na} T_w^4 / 3 k_{abs})} \quad (14)$$

### 2.3. Balance de materia (BM)

Por último, se plantea el balance de masa para el sodio en la capa límite:

$$u \frac{\partial w_A}{\partial x} + v \frac{\partial w_A}{\partial y} = D_{(AB)} \frac{\partial w_A}{\partial y^2} \quad (15)$$

$$\begin{cases} w_A(x,y) = w_{Aw} & y = 0 \\ w_A(x,y) \rightarrow w_{A\infty} & y \rightarrow \infty \end{cases} \quad (16)$$

Definiendo  $A$ : sodio y  $B$ : argón, se tiene que  $w_A$  es la concentración de sodio en la capa límite y  $D_{AB}$  es el coeficiente de difusión binaria del sodio en el argón. Continuando con el procedimiento realizado en el balance de energía, se propone una concentración adimensional:

$$\varphi = \frac{w_A - w_{A\infty}}{w_{Aw} - w_{A\infty}} \quad (17)$$

Para estimar la composición de equilibrio de sodio en la interfaz ( $w_{Aw}$ ) se utilizará la siguiente expresión:

$$w_{Aw} = \frac{P_A^{vap}}{P} \quad (18)$$

Respecto de la condición fuera de la capa límite se considerará que la concentración de sodio es nula ( $w_{A\infty} = 0$ ). Continuando con el desarrollo, si se combina la Ec. (17) con el balance de materia (Ec. 15) y la definición de la variable autosimilar (Ec. 4), se obtiene la ecuación diferencial ordinaria para transferencia de materia:

$$\varphi'' + Sc \varphi' = 0 \quad (19)$$

Como fue mencionado, el agregado de la transferencia de materia al sistema afecta al balance de cantidad de movimiento modificando la condición de contorno sobre la velocidad vertical establecida en ese balance ( $v = 0$  en  $y = 0$ ) en (Ec. 3) lo que demanda agregar una velocidad

superficial no nula, esto se conoce como condición de soplado (*blowing*). En la superficie de contacto del sodio con el argón se cumple:

$$v_w = \frac{1}{1 - w_A} D_{AB} \left. \frac{\partial w_A}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (20)$$

Mediante la adimensionalización y el agregado de la variable autosimilar se llega a la condición de contorno final:

$$f_{(\eta=0)} = \frac{1}{Sc} \left( \frac{w_{Aw} - w_{A\infty}}{1 - w_{Aw}} \right) \varphi'_{(\eta=0)} \quad (21)$$

## 2.4. Ecuaciones finales

Resumiendo, las ecuaciones que deben resolverse en simultáneo son:

$$\begin{cases} f''' + ff' = 0 & (BCM) \\ \theta'' + \frac{N_{rad} Pr f \theta' + 3 \theta^2 (\theta')^2}{N_{rad} + \theta^3} = 0 & (BE) \\ \varphi'' + Sc \varphi' = 0 & (BM) \end{cases} \quad (22)$$

Sujeto a las condiciones de contorno:

$$\begin{cases} f(\eta) = \frac{1}{Sc} \left( \frac{w_{Na(w)} - w_{Na(\infty)}}{1 - w_{Na(w)}} \right) & \eta = 0 \\ \theta(\eta) = \varphi(\eta) = 1 & \eta = 0 \\ f'(\eta) = 1, \theta(\eta) = \frac{T_\infty}{T_w}, \varphi(\eta) = 0 & \eta \rightarrow \infty \end{cases} \quad (23)$$

El método numérico elegido para la resolución de la ecuación diferencial fue el de Runge-Kutta-Fehlberg (Fehlberg, 1969) que consiste en resolver la ecuación diferencial por dos métodos de Runge-Kutta en simultáneo (orden 4 y orden 5) compartiendo coeficientes, lo que permite que el paso de avance sea ajustable ahorrando etapas de cálculo. Adicionalmente, como no se conocen todas las restricciones del sistema en un mismo contorno, se debe agregar un método que permita suponer condiciones en un extremo que sean verificables en el otro contorno, en nuestro caso particular utilizaremos el método del tiro (Cebeci y Keller, 1971).

Para cerrar el sistema de ecuaciones se debe agregar la transferencia de calor que ocurre en la tapa superior del tanque intercambiando calor con el ambiente, al ser un recipiente metálico se considera sólo el fenómeno de conducción:

$$T_{amb} = T_\infty - \left( \frac{e_{aislante}}{k_{T(aislante)}} + \frac{e_{tapa}}{k_{T(tapa)}} \right)^{-1} q_{perd} \quad (24)$$

Siendo la temperatura del ambiente  $60^\circ C$ ,  $q_{perd}$  el calor de pérdidas y  $e_{(tapa)}$  el espesor de la tapa que se estima por cálculo mecánico en  $52 \text{ mm}$ . Esto permite relacionar la temperatura en el interior del tanque con la que se encuentra en el ambiente.

## 3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En primer lugar, se analiza el efecto de la velocidad de arrastre del argón y el espesor de aislante en las pérdidas del reactor. En la Fig. 4a se muestran las pérdidas de energía y en la Fig. 4b las pérdidas anuales de sodio por evaporación, cada una en función de su variable principal (se observó que la fracción de sodio evaporada depende mayoritariamente de la velocidad de

circulación del fluido y las pérdidas totales de calor del espesor del aislante en el reactor). Respecto de los valores informados, prácticamente para cualquier velocidad de flujo de argón las cantidades de sodio evaporadas son desestimables (en masa anual representan 200 g). Lo que sí es relevante son las pérdidas de calor, lo que demanda la instalación de aislación al reactor, pero con un espesor cercano a los 25 mm se logran pérdidas pequeñas con relación al calor generado en el reactor.

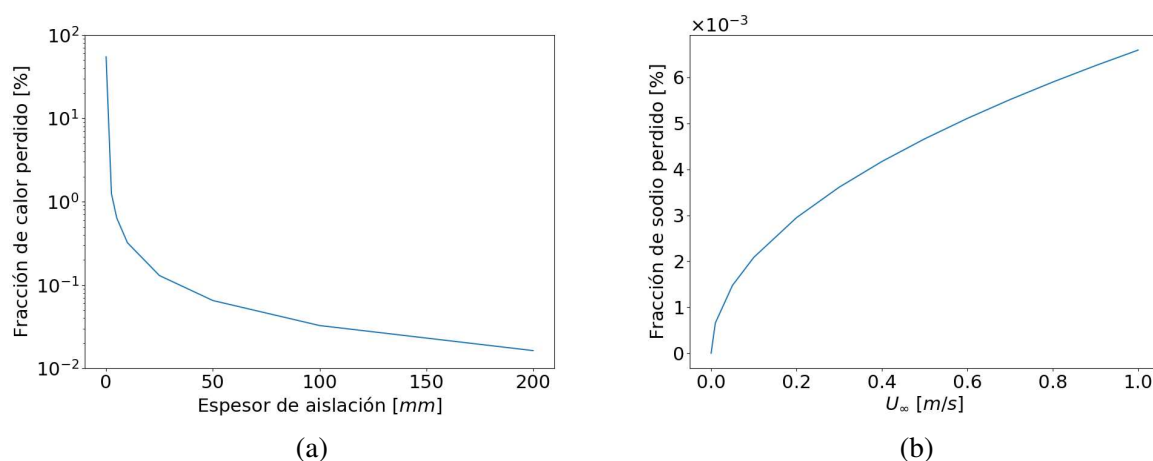


Figura 4: Pérdidas evaluadas en el recipiente del reactor  
(a): Pérdidas de calor en función del espesor de aislante.  
(b): Pérdidas de sodio en función de la velocidad del argón.

Los parámetros utilizados para la resolución de las ecuaciones diferenciales fueron los siguientes:

Propiedad	Valor	Unidad	Referencia
$T_w$	500	$^{\circ}C$	(GIF, 2020)
$w_{Na(w)}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$	-	(Ec. 18)
$w_{Na(\infty)}$	0	-	(Propuesto)
$P$	10	bar	(Propuesto)
$D_{Na-Ar}$	0,805	$cm^2/s$	(Kumada et al., 1979)
$\nu_{Na-Ar}$	$4,518 \cdot 10^{-2}$	$m^2/s$	(Linstrom y Mallard, 2021)
$k_{abs}$	673461	1/m	(Udiljak et al., 2004)
$\epsilon_{Na}$	0,03449	-	(IAEA, 2018)
$N_{rad}$	4658	-	(Ec. 14)
$k_{T(tapa)} (9Cr-1Mo)$	27	$W/mK$	(ASME, 2012)
$k_{T(aislante)}$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$W/mK$	(Aspen aerogels, 2015)

Tabla 2: Parámetros de resolución del sistema de ecuaciones de la capa límite.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio de las capas límite hidrodinámica, térmica y másica fue realizado en la superficie de un reactor nuclear rápido de sodio líquido con una corriente de argón fluyendo sobre la



misma. Se analizaron como parámetros relevantes de la operación las pérdidas de calor y la masa de sodio evaporada debido a las altas temperaturas del sistema.

De los resultados se puede apreciar que en las condiciones operativas analizadas en ningún caso se obtiene una evaporación de sodio apreciable (el máximo ronda el  $6 \cdot 10^{-3} \%$ ) y también, con pequeños valores de espesor de aislante, se logra conservar la mayor parte del calor generado en el reactor, lo que provee cierto grado de factibilidad en la implementación de gas argón para la generación de una capa inerte en este tipo de reactores.

## REFERENCIAS

- Abram T. y Ion S. Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy*, 36:4323-4330, 2008.
- Aspen Aerogels. *Pyrogel XT-E - Product datasheet*, Aspen Aerogels, Inc., 2015.
- ASME. *Process Piping - ASME Code for Pressure Piping, B31*. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- Cebeci T., y Keller H. Shooting and parallel shooting methods for solving the Falkner-Skan boundary-layer equation. *Journal of Computational Physics*, 7:289-300, 1971.
- Fehlberg E. *Low-order classical Runge-Kutta formulas for stepsize control and their application to some heat transfer problems*. National Aeronautics and Space Administration, 1969.
- GIF. *Generation IV International Forum - Annual Report 2020*. Nuclear Energy Agency, 2020.
- IAEA. *Sodium Coolant Handbook: Physical and Chemical Properties*. International Atomic Energy Agency, 2018.
- Kumada T., Ishiguro R., y Kimachi Y. Diffusion coefficients of sodium vapors in argon and helium. *Nuclear Science and Engineering*, 70:73-81, 1979.
- Linstrom P.J. y Mallard, W.G. *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69*. National Institute of Standards and Technology, 2021.
- Mukhopadhyay S., Bhattacharyya K., y Layek G.C. Steady boundary layer flow and heat transfer over a porous moving plate in presence of thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54:2751-2757, 2011.
- Pioro I.L. *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, Woodhead Publishing, 2016.
- Udiljak R., Anderson D., Lisak M., Semenov V.E., y Puech J. Improved model for multipactor in low pressure gas. *Physics of Plasmas*, 11:5022-5031, 2004.
- USEIA. *International Energy Outlook*. U.S. Energy Information Administration - U.S. Department of Energy, 2019.
- USEIA. *Capacity factors for utility scale generators primarily using non-fossil fuels*. U.S. Energy Information Administration - U.S. Department of Energy. Disponible en: [https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm\\_table\\_grapher.php?t=table\\_6\\_07\\_b](https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=table_6_07_b) (Accesado: 10 Marzo 2021).
- Viskanta R., y Grosh R.J. Boundary layer in thermal radiation absorbing and emitting media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5:795-806, 1962.
- White F. *Viscous fluid flow*. McGraw Hill, 2006.
- WNA. *Fast Neutron Reactors*. World Nuclear Association. Disponible en: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> (Accesado: 14 Julio 2021).