

# DIMENSIONAMIENTO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR PARA ENFRIAMIENTO A 165 K DE HIDRÓGENO PRESURIZADO

Valdez Cervantes, Oscar Daniel (1), Elizalde Blancas, Francisco (2)

1 [Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [od.valdezcervantes@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [franciscoeb@ugto.mx]

## Resumen

En este trabajo se presenta el dimensionamiento para cada uno de los seis evaporadores de un sistema de refrigeración de hidrógeno. El dimensionamiento se llevó a cabo mediante una herramienta desarrollada en Matlab que permite al usuario ingresar las condiciones de operación, así como las propiedades necesarias para el cálculo de las dimensiones del evaporador, considerando que el refrigerante se encuentra estático en la coraza y siempre cubre el área de transferencia de calor. Con la herramienta antes mencionada, también se le permite al usuario seleccionar el diámetro interior y exterior de los tubos recomendando que se seleccionen tamaños comerciales. De la misma manera, el usuario puede considerar la resistencia térmica de la pared de los tubos, así como la rugosidad para obtener dimensiones más reales.

## Abstract

This paper presents the dimensioning for each of the six evaporators of a hydrogen refrigeration system. The sizing was carried out by developing a tool in Matlab that allows the user to prescribe the operating conditions, as well as the properties needed to calculate the dimensions of the evaporator, considering that the refrigerant is static on the shell side and always covers the heat transfer area. With the aforementioned tool, the user is also allowed to select the inside and outside diameter of the pipes recommending that commercial sizes be selected. In the same way, the user can consider the wall thermal resistance of the pipes, as well as the roughness in order to obtain more real dimensions.

## Palabras Clave

Intercambiadores de calor; evaporador; hidrógeno

## INTRODUCCIÓN

El hidrógeno se puede generar y usar sin emitir bióxido de carbono y otros gases que provocan el efecto invernadero, lo cual es conveniente en comparación con otros combustibles, ya que es más amigable con el medio ambiente. El hidrógeno se puede obtener a partir de sustancias elementales como el agua, y usando cualquier fuente de energía. Si se genera a partir de una fuente de energía limpia como calor y/o electricidad generada por energía solar, energía eólica o energía nuclear, el hidrógeno se convierte en la mejor opción para almacenar y transportar energía, convirtiéndose en un elemento necesario para futuros sistemas energéticos [1].

El hidrógeno a bajas temperatura (165 K) y altas presiones (900 bar) puede reducir su costo de distribución en comparación con los sistemas o condiciones convencionales (licuado, compresión, transporte a temperatura ambiente, gasoductos, etc.) [2].

El alto costo de producción y de distribución de hidrógeno ( $H_2$ ) actualmente es alto, lo cual limita su uso en muchas ocasiones. Los componentes de una estación convencional son los causantes del costo elevado debido al mantenimiento frecuente y al gran consumo de energía eléctrica [3].

El Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore trabaja en un concepto de almacenamiento de hidrógeno que pueda demostrar una ventaja con respecto a las tecnologías existentes. El concepto es un recipiente a presión criogénico que puede almacenar hidrógeno líquido con una mejora de manera significativa en la resistencia térmica. Además, este tipo de recipientes puede operar con hidrógeno gaseoso a temperatura ambiente [4].

Anteriormente se ha propuesto un sistema completo [5], del cual solo se dimensionarán los seis intercambiadores de calor (evaporadores) involucrados directamente con el enfriamiento de hidrógeno. En el sistema planteado el costo total de distribución es de 2.033 dólares por kilogramo de hidrógeno, el cual es menor al costo total de distribución convencional que es de 3.5 dólares por kilogramo de hidrógeno [5].

En este trabajo se dimensionan los seis evaporadores mencionados anteriormente realizando modificaciones debido a la escasa información de la aplicación en cuestión (cambio de fase en la parte externa de los tubos de un intercambiador de tubos y coraza). El refrigerante de cada uno de ellos estará siempre estático y cubriendo el área de transferencia, haciendo pasar al hidrógeno por el interior de los tubos en línea recta para reducir las caídas de presión del mismo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Nomenclatura

$A$	Área de transferencia de calor [ $m^2$ ]
$C_{min}$	Capacidad calorífica mínima [ $W/K$ ]
$d_i$	Diámetro interior de los tubos [ $m$ ]
$d_o$	Diámetro exterior de los tubos [ $m$ ]
$f$	Factor de fricción
$g$	Aceleración gravitacional [ $m/s^2$ ]
$h_i$	Coefficiente convectivo interior [ $W/m^2 K$ ]
$h_o$	Coefficiente convectivo exterior [ $W/m^2 K$ ]
$k$	Conductividad térmica del hidrógeno [ $W/m K$ ]
$k_f$	Conductividad térmica del refrigerante como liquido saturado [ $W/m K$ ]
$k_m$	Conductividad térmica del material [ $W/m K$ ]
$\dot{m}$	Flujo másico del hidrógeno [ $kg/s$ ]
$NTU$	Número de unidades de transferencia
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$P_{red}$	Presión reducida
$q$	Flujo de calor [ $W/m^2$ ]
$Re$	Número de Reynolds
$T_{sat}$	Temperatura de saturación del refrigerante
$U$	Coefficiente global de transferencia de calor [ $W/m^2 K$ ]

símbolos griegos

$\beta$	Ángulo de contacto [°]
$\Delta H$	Cambio de entalpía [J/kg]
$\Delta T_{ml}$	Diferencia media logarítmica de temperatura [K]
$\varepsilon$	Efectividad de transferencia de calor
$\varepsilon_m$	Rugosidad del material [m]
$\rho_f$	Densidad del refrigerante como líquido saturado [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	Densidad del refrigerante como vapor saturado [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensión superficial del refrigerante

Para el análisis se desarrolló una herramienta en MATLAB, donde el usuario ingresa las condiciones de operación (temperatura, presión, calidad, flujo másico ya establecidas previamente), así como las propiedades necesarias para realizar todos los cálculos (entalpías, calores específicos, viscosidad dinámica, densidad, conductividad térmica, entre otras), las cuales se obtuvieron de la base de datos del software REFPROP. También se le permite al usuario seleccionar las dimensiones de los tubos ingresando el diámetro interior y el diámetro exterior, para este trabajo se seleccionaron diámetros comerciales (diámetros nominales) de 3/4, 1, 2, 3, 4, y 5 pulgadas considerando que todos son cédula número 80 y se ingresaron los diámetros interiores y exteriores correspondientes. De igual manera el usuario puede escoger si desea hacer el análisis considerando los tubos lisos o en caso contrario puede ingresar la rugosidad del material seleccionado, así como considerar la resistencia térmica debida a la pared de los tubos. En el caso de estudio se consideró que el material de los tubos es acero inoxidable 316, utilizando una rugosidad de 0.002 mm y una conductividad térmica de 15.2 W/m-K.

Para el análisis de los intercambiadores de calor mediante la herramienta desarrollada pueden utilizarse dos métodos diferentes: el método de la diferencia media logarítmica de temperatura o el método de la efectividad-NTU esperando que ambos métodos tengan resultados similares.

Para el método de la diferencia media logarítmica de temperaturas se utilizarán la ecuación (1) y para el método de la efectividad-NTU la ecuación (2) y (3) siendo esta última la relación de efectividad y NTU para cualquier intercambiador con cambio de fase.

$$\dot{m}\Delta H = UA\Delta T_{ml} \quad (1)$$

$$NTU = UA/C_{min} \quad (2)$$

$$NTU = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (3)$$

Para ambos métodos se requiere el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, el cual se obtiene con la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2k_m} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (4)$$

Para el cálculo del coeficiente convectivo exterior (coeficiente convectivo del refrigerante) se utilizará la ecuación (5), (6), y (7) para el caso de evaporación nucleada alrededor de un tubo circular, usando  $\beta=35^\circ$  [6].

$$h_o = 41.4 \frac{k_f}{D_b} \left[ \frac{q D_b}{k_f T_{sat}} \right]^{C_2} (-\log_{10} P_{red})^{-1.52} \times \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.53} \quad (5)$$

$$C_2 = 0.835(1 - P_{red})^{1.33} \quad (6)$$

$$D_b = 0.0146\beta [2\sigma/g(\rho_f - \rho_g)]^{0.5} \quad (7)$$

Para el cálculo del coeficiente convectivo interno se utilizará la ecuación (8), para el factor de fricción proporcionada por S. E. Haaland en 1983, la ecuación (9) relacionada con el número de Nusselt para flujo interno en tuberías circulares propuesta por Gnielinski en 1976 válida para un rango del número de Prandtl y Reynolds ( $0.5 \leq Pr \leq 2000$ ;  $3 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ ), y, por último, la ecuación (10) que brinda una relación entre el número de Nusselt y el coeficiente convectivo interno [7].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\varepsilon_m/d_i}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (8)$$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \quad (9)$$

$$Nu = \frac{h_i d_i}{k} \quad (10)$$

Es importante mencionar que la herramienta desarrollada cuenta con más correlaciones para flujo interno en caso de no cumplir con el rango de la ecuación (9), así como ecuaciones para el cálculo del factor de fricción y el número de Nusselt si se consideran tubos lisos, y algunas consideraciones si se desea despreciar la resistencia térmica de la pared de los tubos.

A continuación, en la Tabla 1 y Tabla 2 se mostrarán las condiciones de operación para los seis evaporadores que conforman el sistema de refrigeración para el hidrógeno planteado en un trabajo previo, considerando una presión para el hidrógeno de 875 bar [5]. Tomando en cuenta que el hidrógeno fluye por el interior de los tubos, y el refrigerante siempre se encuentra estático y cubriendo el área de transferencia de calor, es como se determinarán los coeficientes convectivos de transferencia de calor.

**Tabla 1: Temperatura de entrada y salida del hidrógeno para cada evaporador.**

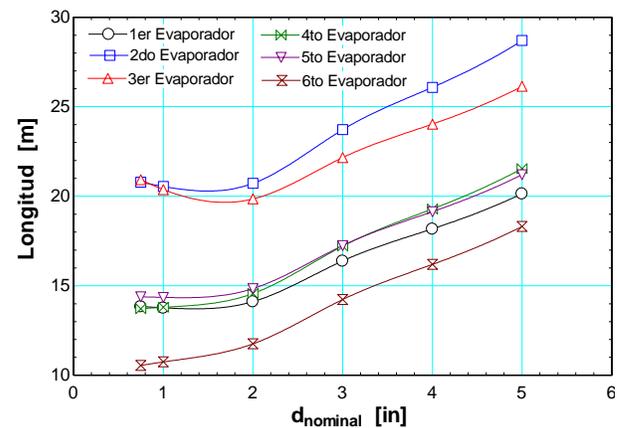
Evaporador	Temperatura de entrada del hidrógeno [K]	Temperatura de salida del hidrógeno [K]
1	300	279.2
2	279.2	250.3
3	250.3	231.9
4	231.9	207.3
5	207.3	188.7
6	188.7	165

**Tabla 2: Refrigerante utilizado en cada evaporador y temperatura de operación.**

Evaporador	Refrigerante	Temperatura de operación [K]
1	Propano	269.2
2	Propano	240.3
3	Etileno	221.9
4	Etileno	197.3
5	Etileno	178.7
6	Metano	155

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestran las longitudes obtenidas para cada evaporador con cada uno de los diámetros seleccionados, donde se puede apreciar que el comportamiento al variar el diámetro de los tubos con respecto a la longitud del intercambiador es similar para todos los evaporadores, de igual manera se observa que el aumento del diámetro de los tubos no logra disminuir la longitud del intercambiador de manera significativa, e incluso para los diámetros mayores aumenta la longitud, por lo cual se decidió seleccionar el diámetro de 3/4 de pulgada para todos los evaporadores.



**Figura 1: Longitud para cada uno de los evaporadores para diferentes diámetros nominales.**

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de longitud para cada evaporador considerando el diámetro de 3/4 de pulgada.

**Tabla 3: Longitud de cada evaporador considerando un diámetro de 3/4 de pulgada.**

Evaporador	Longitud [m]
1	13.8364
2	20.7875
3	20.9202
4	13.7073
5	14.3785
6	10.5372

## CONCLUSIONES

Realizando un análisis comparativo entre los métodos de la diferencia media logarítmica de temperatura y efectividad-NTU se encontró que para el caso de estudio la diferencia entre ellos es aproximadamente de 0.05%, por lo cual se concluye que puede analizarse por cualquiera de los dos métodos sin obtener variaciones significativas en los resultados.

Es importante continuar con el estudio de estos procesos que posicionan al hidrógeno de una mejor manera en el mercado ya que reducen el costo por kilogramo de hidrógeno.

Como trabajos posteriores se puede hacer el análisis de costos de cada evaporador.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo de mi asesor, por estar siempre al pendiente y ayudarme a concluir este verano de investigación de la mejor manera.

## REFERENCIAS

- [1] Gene D. Berry, Salvador M. Aceves. (2006). La Economía del Hidrógeno como Solución al Problema de la Estabilización del Clima Mundial. Acta universitaria Dirección de Investigación y Posgrado Universidad de Guanajuato, 16(1), 5-14.
- [2] Andrew H. Weisberg, Salvador M. Aceves, Francisco Espinosa-Loza, Elias Ledesma-Orozco, Blake Myers, Brian Spencer. (2013). Cold hydrogen delivery in glass fiber composite pressure vessels: Analysis, manufacture and testing. International Journal of Hydrogen Energy, 38(22), 9271-9284.
- [3] Ahmed S, Sutherland E. (2013). Proceedings of the Hydrogen Compression, Storage, and Dispensing Cost Reduction Workshop. Argonne National Laboratory.
- [4] S. M. Aceves, G. D. Berry, F. Espinosa, T. Ross, A. H. Weisberg. (2007). Storage of Hydrogen in Cryo-Compressed Vessels, DOE Hydrogen Program, FY. Annual Progress Report.
- [5] Guadalupe Camacho Vázquez. (2016). Enfriamiento de Hidrógeno Presurizado a 165 K para Reducir el Costo de Distribución (Tesis de Maestría). Universidad de Guanajuato, Salamanca Guanajuato.
- [6] Dongsoo Jung, Heungseok Lee, Dongsoo Bae, Sukjae Oho. (2004). Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants. International Journal of Refrigeration, 27, 409-414.
- [7] Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghanjar. (2011). Transferencia de calor y masa FUNDAMENTOS Y APLICACIONES. México, D.F. McGRAW-HILL.