

# DISEÑO CONCEPTUAL DE UN VAPORIZADOR DE GAS NATURAL LICUADO (GNL) DE UNA PLANTA DE REGASIFICACIÓN EN COLOMBIA

*Ricardo Lizarazo Suárez*<sup>1</sup>

Ingeniero Mecánico, UN, Especialista en Gerencia de Proyectos, UN - Profesional Proyectos Especiales Promigas S.A. E.S.P.  
Barranquilla, Colombia

*Danny Guillermo Cañas Rojas*<sup>2</sup>

Especialista en Ingeniería del Gas, UIS - Ingeniero de Cuarto de Control Planta de Gas Gibraltar  
Bucaramanga, Colombia

**Resumen:** Debido al posible déficit de gas que Colombia podría experimentar, el gobierno pretende implementar una planta de regasificación de gas natural licuado (GNL) en la bahía de Cartagena. Teniendo en cuenta que para el país serán procesos y tecnologías novedosas, se desarrolla este estudio del análisis teórico de un vaporizador de GNL, tomando como base de cálculo una capacidad estimada a regasificar de 400 MMSCFD, con el fin de determinar el área, las dimensiones y flujo de agua de mar requerido en un vaporizador de GNL. Para esto, se utilizaron modelos matemáticos tradicionales para el cálculo de transferencia de calor en intercambiadores, la herramienta de simulación numérica Aspen HYSYS y el apoyo de las normas europeas EN1160 y EN 1473 para diseño de plantas de GNL. Finalmente se obtuvo el diseño de un vaporizador de tablero abierto (ORV) que requiere un área de 75 m<sup>2</sup>, repartida en tubos de 2" de diámetro y 5 m de alto con un flujo de agua para vaporizar el GNL de 16600 m<sup>3</sup>/h.

**Palabras clave:** GNL, planta de regasificación de GNL, vaporizador.

**Abstract:** Due to possible gas shortage that Colombia could experience over the next few years, the national government will develop the construction of a regasification terminal for liquefied natural gas (LNG) in the Bay of Cartagena. Given that in the country will be processes and novel technologies, the theoretical analysis of LNG vaporizer is developed in this work, based on a estimated regasification capacity of 400 MMSCFD, in order to obtain the surface area, sizing and water flow needed in a LNG vaporizer. To this, traditional mathematical models were used to calculate the heat transfer in exchangers and were used the numerical simulator tool Aspen HYSYS as well as the european standars EN 1160 and EN 1473 for the LNG regasification plant design. Finally, LNG open rack vaporizer (ORV) was obtained with 75 m<sup>2</sup> surface area, 5 m and 2" height and diameter tubes respectively and 16600 m<sup>3</sup>/h flow water as a source of heat to regasify the LNG.

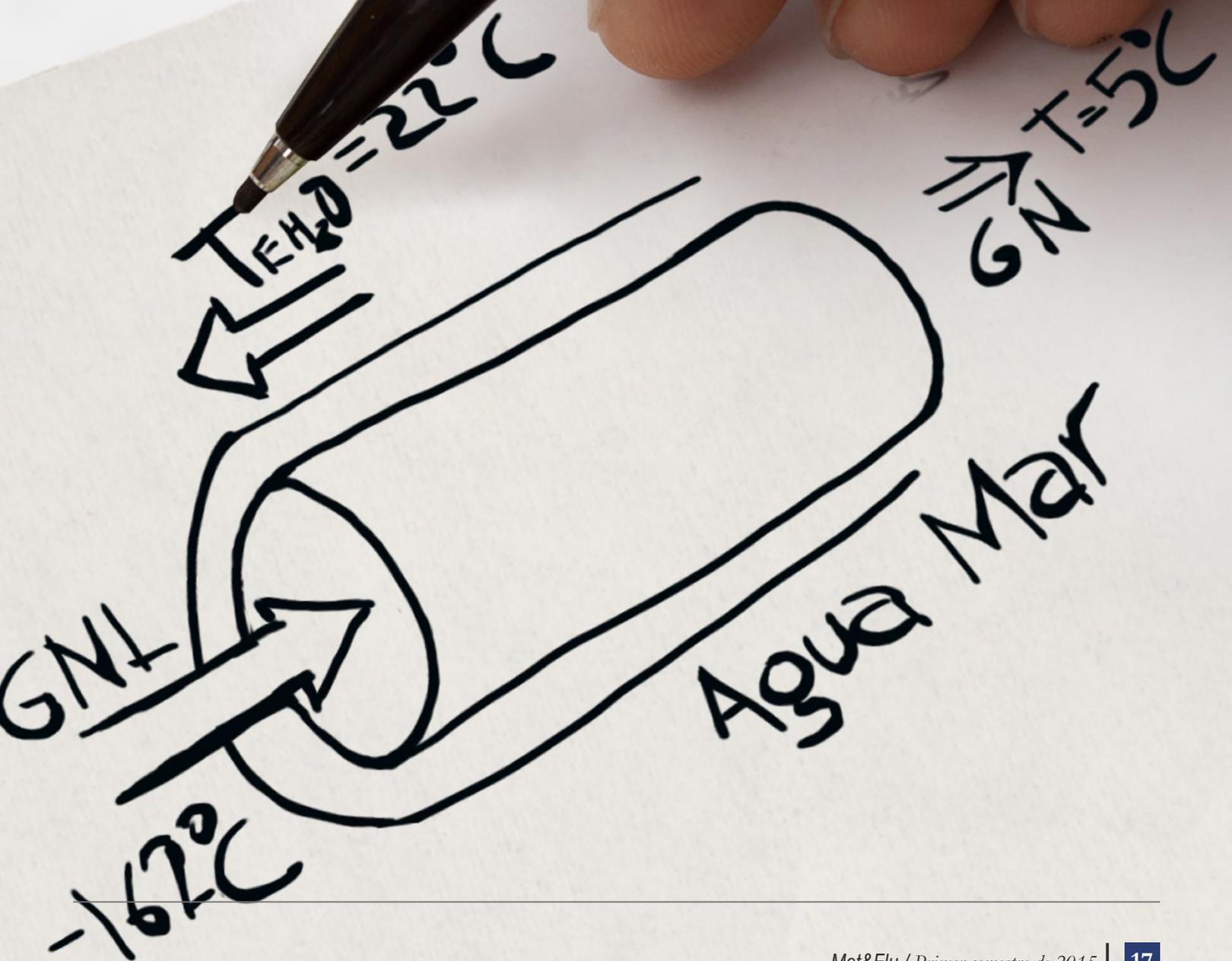
**Keywords:** LNG, LNG regasification plant, vaporizer.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología del gas natural licuado a nivel mundial está muy bien desarrollada y para algunos países que no disponen de fuentes primarias para generación de energía, se convierte en una fuente de suministro más económica, ambientalmente amigable y menos riesgosa que otras fuentes tales como la energía nuclear (caso Japón); además, para los países que disponen de grandes reservas de gas natural,

exportarlo les genera gran rentabilidad económica, muy importante para su producto interno bruto. En países autosuficientes en el consumo de gas natural, como lo es Colombia, se inició la implementación esta tecnología de importación de GNL, como estrategia para fortalecer la garantía de la disponibilidad de gas natural, ya que se estima, que el balance entre la producción de gas y su consumo es igual a cero para el año 2018 [1]. En la figura 1 la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)

<sup>1</sup> ricardo.lizarazo@promigas.com    <sup>2</sup> dany7987@hotmail.com



presenta este balance de gas, haciendo una proyección hasta el año 2022, en donde estudia tres escenarios principales (escenario alto, medio y bajo).

Sumado a lo anterior, otra variable que consideró el gobierno, es el fenómeno que se presenta cada 4 o 5 años llamado "El niño", el cual trae una sequía extrema, haciendo que las hidroeléctricas sean afectadas en su producción y por lo tanto se debe contar con una fuente de suministro de respaldo para garantizar que las termoeléctricas generen gran parte de la energía, durante los períodos en que se da este fenómeno.

La importación de GNL requiere la implementación de una planta de regasificación, donde el GNL es recibido en fase líquida y enviado desde los buques metaneros hacia los tanques de almacenamiento, o hacia una barcaza con capacidad de almacenamiento y regasificación de GNL. Posteriormente es vaporizado (llevado a su estado gaseoso) y finalmente entregado a la red nacional de transporte de gas natural, para los consumidores finales. Por último, este trabajo se en el estudio del equipo de mayor relevancia del terminal de regasificación que es el vaporizador.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Conceptos generales de vaporizadores de GNL

Diferentes autores han estudiado la dinámica de estos terminales de importación de GNL, como es el caso de Mokhatab [2] quien enuncia los principales equipos del terminal como: brazos de descarga de GNL, tanque de almacenamiento de GNL, compresor de gases de evaporación (boil off gas o BOG), bombas de baja y alta presión de GNL, recondensador de BOG y el vaporizador de GNL. Para este artículo, se se consideró que la etapa más importante del terminal de regasificación, es el sistema de vaporización, por lo que se centró en el estudio del vaporizador.

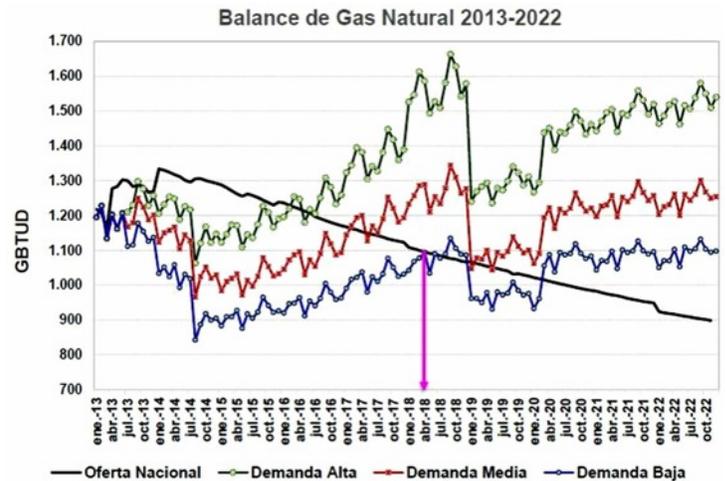


Figura 1. Balance De Gas Natural Para Colombia (Fuente: UPME)

El vaporizador de GNL es un intercambiador de calor que transforma el GNL de estado líquido a estado gaseoso por medio de un aporte de calor, para ser enviado a red nacional de transporte, listo para su consumo. La regasificación se realiza a alta presión (entre 70 y 80 Bar aproximadamente) debido a que si se desea inyectar a la red, cuya presión es elevada, es más sencillo elevarle la presión a un líquido, que a un gas, hablando en términos de energía. Los vaporizadores utilizados en el mundo son:

Vaporizador de tablero abierto (Open rack Vaporizer ORV): Este está construido por paneles verticales de tubos aleteados, fabricados de aleaciones de aluminio, por donde en su interior, entra el GNL en fase líquida, de abajo hacia arriba, calentado a lo largo de su recorrido por una cortina de agua de mar a temperatura ambiente. Esta agua, es de especial manejo, ya que primero, el vaporizador debe ser diseñado para que la caída de temperatura sea de 5 °C aproximadamente (este valor se toma como referencia en el diseño de este trabajo, ya que viene dado por regulaciones locales internacionales, siendo utilizado en las diferentes diseños desarrollados en las plantas alrededor del mundo [3]) y segundo el agua debe tener tratamiento químico para evitar incrustaciones y posible crecimiento marino dentro de los tubos. También se debe considerar, las condiciones químicas de descarga del

agua de mar, ya que puede causar ambientalme impactos negativos.

Vaporizadores de combustión sumergida (Submerged Combustion Vaporizer SCV): El GNL va dentro de tubos de acero inoxidable, sumergidos en un baño de agua calentada por la combustión de gas natural. La figura 2 muestra un vaporizador ORV y un SCV.

Vaporizadores de carcasa y tubo (Shell and Tube Vaporizer STV): Requieren de una fuente externa de calor, típicamente una mezcla de agua/glicol y finalmente los vaporizadores de aire ambiente (Ambient Air Vaporizer AAV) que utilizan aire como fuente de calor para vaporizar el GNL [4].

En el mundo, los vaporizadores más utilizados son los de tablero abierto (ORV), seguido de los vaporizadores de combustión sumergida (SCV) en el orden de 70% y 20 % respectivamente y el 10% final se reparten entre las demás tecnologías [2].

Patel et al [3] evalúan la mejor alternativa de selección de las mismas tecnologías de vaporización mencionadas anteriormente, llegando a la conclusión que el sitio y las condiciones ambientales son el criterio principal de selección; pero también concluye que los vaporizador más amigables con el

ambiente son los que usan aire como fuente de calor para vaporizar el GNL. Para el caso del Caribe Colombiano cuya capacidad de regasificación es 2,8 millones de toneladas por año (2,8 MTA) aproximadamente, estos vaporizadores serian adecuados, pero al mismo tiempo Patel sugiere que no sirven para vaporizar cantidad grandes de GNL (mayor a 0,3 MTA), ya que comienzan a tener serios problemas de escarchamiento de hielo. En este mismo orden de ideas, según Petel, para locaciones donde la temperatura ambiente durante el año es mayor a 18 °C, después de los vaporizadores con aire, los más adecuados son los que usan agua de mar como fuente de energía (ORV), los cuales poseen bajos costos de operación y permiten manejar grandes cantidades de GNL (mayor a 0,3 MTA). De acuerdo a lo anterior, para este estudio, se seleccionó para el diseño del vaporizador el de tablero abierto (ORV), siendo este, el más utilizado en el mundo y el más conveniente para ser aplicado en Colombia, debido a la fácil disponibilidad de la fuente de energía requerida para vaporizar el GNL [3].

### 3. CÁLCULOS Y RESULTADOS

El gas natural licuado, de acuerdo al país que lo exporta, tiene diferentes composiciones, este varía entre 430 Kg/m<sup>3</sup> y 470 Kg/m<sup>3</sup>.

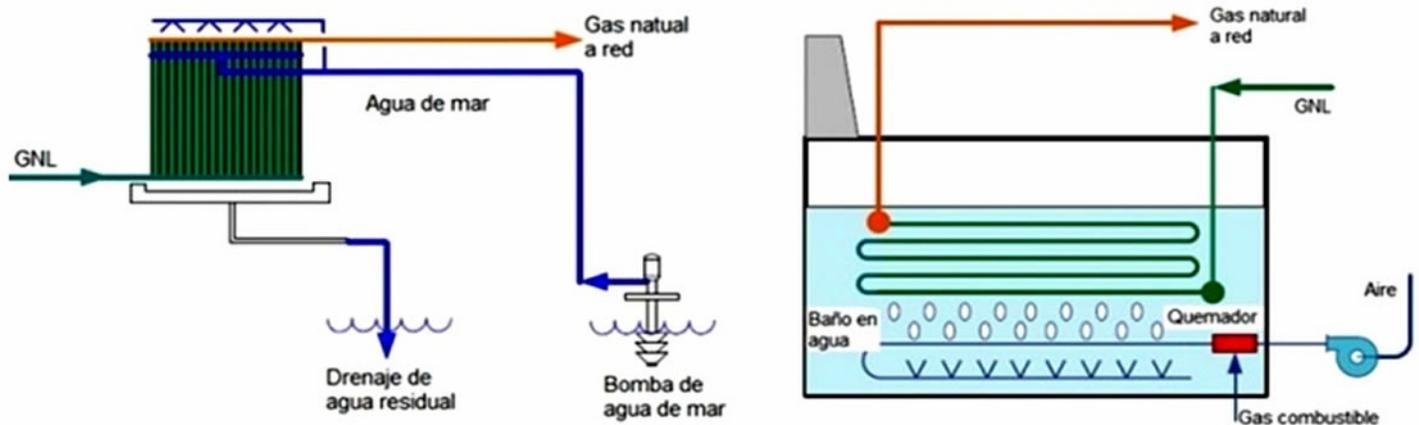


Figura 2. Vaporizadores Tipo ORV y SCV (Fuente: Patel et al., [3])

Composición de GNL (%)			
Componente	GNL liviano	GNL mediano	GNL pesado
C1	98	92	87
C2	14	6	95
C3	4	1	25
C4	1	0	5
N2	1	1	5
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	428	446	465

**Tabla 1.** Composición de 3 tipos diferentes de GNL

La tabla 1 muestra la composición típica de un GNL liviano, mediano y pesado [5].

Para los cálculos del diseño del vaporizador, se considera un GNL mediano con una densidad promedio de 450 Kg/m<sup>3</sup> a una temperatura de -162 °C (-260 °F).

### 3.1 Cálculo del vaporizador de GNL

Para el cálculo de las principales variables del vaporizador se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El volumen a regasificar diario es de 400 MMSCFD que corresponden a 787 m<sup>3</sup>/h de GNL o a 2,8 MTA (Esta capacidad a regasificar está definida por el máximo déficit de gas durante el plan de abastecimiento en Colombia 2012-2022 [6]).
- Según lo indica la norma EN 1160 "Installation and equipment for liquefied natural gas - General characteristics of liquefied natural gas", el material de los tubos que conforman el vaporizador debe ser de aleaciones de aluminio [7]. Un material que es bien utilizado actualmente para vaporizadores de GNL tipo ORV, es la aleación de aluminio 5052 o la aleación UNS A95052.
- La densidad del GNL a vaporizar se considera como 450 Kg/ m<sup>3</sup>.

De acuerdo a la norma EN1473 "Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of

Onshore Installations" la temperatura mínima de salida del gas después de ser vaporizado es 0 °C, así para este estudio se considera que T sal gas = 5 °C [8].

De acuerdo a las consideraciones anteriores, se calcula del área de intercambio de calor (1):

$$Q \text{ total} = U * A * \Delta T \ln \quad (1)$$

Dónde:

Q total = Flujo de calor necesario que requiere el GNL para ser regasificado.

U = Coeficiente global de transferencia de calor del vaporizador.

A = Área de intercambio de calor requerida para vaporizar el GNL.

$\Delta T \ln$  = Diferencia de temperatura media logarítmica en el vaporizador.

### 3.2 Cálculo del flujo de calor necesario a transferir al GNL (Q total)

Para el flujo de calor (Q total) necesario que requiere el GNL para ser regasificado se debe tener en cuenta que dentro de los tubos del vaporizador, se presenta cambio de fase y que el calor total es igual al flujo de calor de vaporización de GNL (Q vap) más el flujo de calor de calentamiento (Q cal) del gas ya vaporizado, así como lo muestra (2).

$$Q \text{ total} = Q \text{ vap} + Q \text{ cal} \quad (2)$$

El Q vap se calcula de acuerdo a (3) [9].

$$Q \text{ vap} = \dot{m} \text{ GNL} * \lambda \text{ vap} \quad (3)$$

Para una densidad del GNL de 450 Kg/m<sup>3</sup> y volumen a regasificar de 787 m<sup>3</sup>/h se tiene el flujo másico de GNL ( $\dot{m}$  GNL) es 98.4 Kg/s. A estas condiciones el calor latente de vaporización ( $\lambda$  vap) es aproximadamente 500 KJ/Kg, por lo tanto:

$$Q \text{ vap} = 98.4 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 500 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \sim 49200 \text{ Kw} \quad (4)$$

Para determinar (Q cal) se utiliza la ecuación (5).

$$Q_{cal} = \dot{m}_{GN} * C_p_{GN} * \Delta T \quad (5)$$

Dónde:

$\dot{m}_{GN}$  = Flujo másico de gas natural ya vaporizado = 98.4 Kg/s

$C_p_{GN}$  = Calor específico del gas vaporizado  $\approx 2.5 \text{ KJ} / (\text{Kg} * \text{K})$

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre la salida y la entrada del gas natural = 167 K

Por lo tanto se tiene que:

$$Q_{cal} = 98.4 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 2.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * 167 \text{ K} \approx 41000 \text{ Kw} \quad (6)$$

De acuerdo a (2) se determina el  $Q_{total}$ :

$$Q_{total} \approx 90000 \text{ Kw} \quad (7)$$

### 3.3 Cálculo del flujo másico de agua necesario que aporte el $Q_{total}$

Con el flujo de calor ( $Q_{total}$ ) calculado en el numeral anterior, se determina el flujo másico de agua ( $\dot{m}_{H_2O}$ ) necesario para aportar este calor. Utilizando la forma (5) y el calor específico del agua ( $C_p_{H_2O}$ ) pero analizando el sistema de agua se tiene que:

$$Q_{total} = \dot{m}_{H_2O} * C_p_{H_2O} * \Delta T \quad (8)$$

Como buena práctica por regulaciones ambientales en países del mundo, la caída de temperatura del agua de mar en vaporizadores, no debe ser superior a 5 °C. Por lo anterior, con la temperatura de agua de mar de entrada = 22 °C y  $C_p_{H_2O}$  a esas condiciones = 3.9 KJ / (Kg \* K) [10] se tiene que:

$$90000 \text{ Kw} = \dot{m}_{H_2O} * 3.9 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * 5 \text{ K} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{H_2O} \approx 4600 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \approx 16600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (10)$$

### 3.4 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U)

Utilizando la herramienta aspen HYSYS (versión 8.0), se realiza la simulación numérica del terminal de regasificación apoyado con los cálculos y condiciones operacionales anteriormente mostrados, para determinar el coeficiente global de transferencia de calor (U). La figura 3 muestra el esquema del diagrama de flujo del terminal de regasificación, simulando en Aspen HYSYS.

Para esta simulación se escogió el mismo paquete termodinámico utilizado por Kumar [11] en su estudio "ASPEN simulation: Liquefied natural gas import terminal safety and security study" donde inicialmente

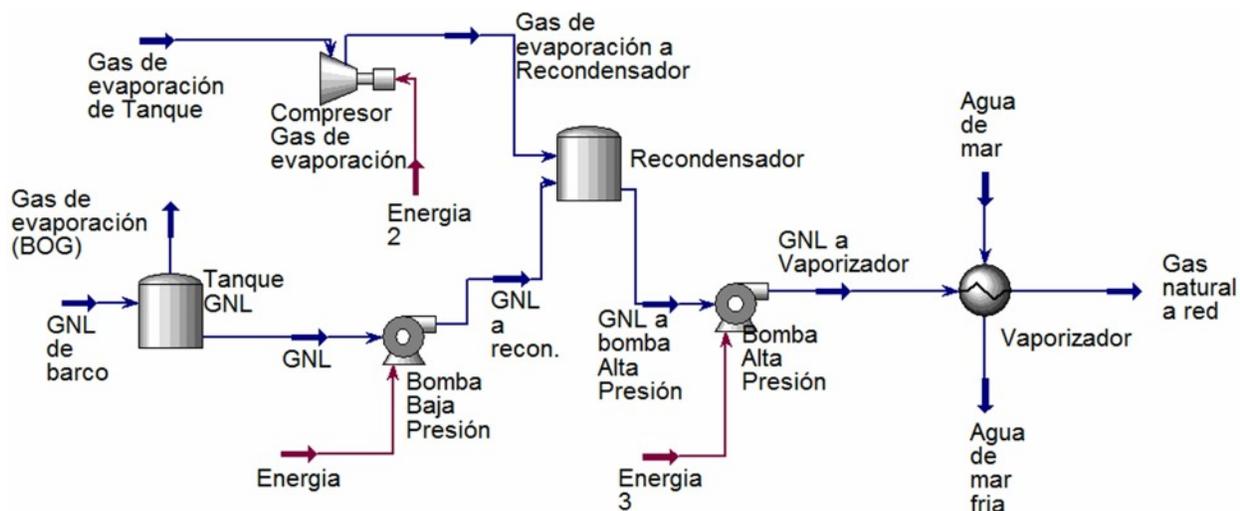


Figura 3. Diagrama de flujo terminal de regasificación simulado en ASPEN HYSYS

estudia el comportamiento de varios paquetes termodinámicos de Aspen HYSYS para así seleccionar el mejor para su estudio. De acuerdo a las condiciones de operación del GNL, el paquete que mejor se ajusta para este caso es Soave-Redlich-Kwong (SRK).

Por medio de la simulación, se determina  $U$  dando como resultado (11):

$$U \approx 17600 \frac{W}{m^2 * K} \quad (11)$$

### 3.5 Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica ( $\Delta T \ln$ )

La figura 4 muestra la dirección y la temperatura de cada uno de los fluidos que pasan por los tubos del vaporizador. La diferencia de temperatura a lo largo del tubo no es constante, sigue una forma logarítmica (" $\Delta T \ln$ ") por lo que se calcula, como lo muestra (12):

$$\Delta T \ln = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (12)$$

Dónde:

$$\Delta T_1 = T_{S.H_2O} - T_{GNL} = 17 \text{ °C} - (-162 \text{ °C}) = 179 \text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = T_{E.H_2O} - T_{GN} = 22 \text{ °C} - 17 \text{ °C} = 5 \text{ °C}$$

Utilizando la ecuación (12) y realizando los cálculos se obtiene que:

$$\Delta T \ln = 68.81 \text{ °C} = 68.81 \text{ K} \quad (13)$$

### 3.6 Cálculo del área de intercambio de calor útil para vaporizar el GNL

Utilizando la ecuación (1) y con los resultados



Figura 4. Dirección de los fluidos en el tubo del vaporizador

presentados en esta sección se determina el área de transferencia de calor como se muestra a continuación:

$$A = \frac{Q \text{ total}}{U * \Delta T \ln} = \frac{90000 \text{ Kw}}{17.6 \frac{Kw}{m^2 * K} * 68.81 \text{ K}} \quad (14)$$

$$A = 74,5 \text{ m}^2 \sim 75 \text{ m}^2 \quad (15)$$

### 3.7 Cálculo del número de tubos del vaporizador

La altura de los tubos de un vaporizador tipo ORV pueden llegar a medir hasta 7 metros [12], por lo cual para determinar el número de tubos del vaporizador se requiere de las siguientes consideraciones:

- Altura de los tubos  $h = 5 \text{ m}$
- Diámetro de los tubos  $d = 2'' = 50.8 \text{ mm}$
- Diámetro interior de los tubos  $d_{\text{interior}} = 50 \text{ mm}$

El cálculo del área superficial de cada tubo (" $A_{\text{tubo}}$ ") se calcula como (16):

$$A_{\text{tubo}} = \pi * d_{\text{interior}} * h = \pi * 0.05 \text{ m} * 5 \text{ m} \quad (16)$$

$$A_{\text{tubo}} = 0,78 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Utilizando la ecuación (15) y " $A_{\text{tubo}}$ ", se halla el número de tubos del vaporizador (" $\# \text{ tubos}$ "), de la siguiente manera:

$$\# \text{ tubos} = \frac{A}{A_{\text{tubo}}} = \frac{75 \text{ m}^2}{0,78 \text{ m}^2} \approx 96 \text{ tubos} \quad (18)$$

## 4. DISCUSIÓN

En general, la selección del sistema de vaporización depende ampliamente de las condiciones ambientales, las limitaciones por regulaciones, consideraciones operativas, localización, análisis económicos y las condiciones finales de distintos tipos de emisiones, tales como los gases de combustión en el caso del SCV o la temperatura de descarga del agua de mar en el ORV. Por otra parte,

el diseño del vaporizador de acuerdo a las normas europea EN 1160 y la EN 1473, muestra que se necesita un vaporizador aproximadamente de 100 tubos de diámetro de 2" para poder obtener un volumen de gas regasificado de 400 MMSCFD. Al mismo tiempo se observa que se necesita un flujo considerablemente alto de agua, que pueda aportar la energía necesaria para vaporizar el GNL, pero al mismo tiempo, un buen manejo racional de esta agua, evita los impactos negativos que pueda tener sobre la vida marina.

Finalmente, estudios económicos se han desarrollado para el terminal que actualmente se está implementando en Cartagena, y al contar con la alternativa de generación de energía eléctrica alimentando las plantas térmicas con gas natural proveniente de la planta de regasificación, se estima que se podrían alcanzar ahorros cercanos a los 612.000.000 USD anuales durante los próximos 10 años de operación en los que planta requiera entrar en servicio. Lo anterior deja ver que estar preparados para situaciones de déficit en la garantía energética del país, e implementar estrategias de aseguramiento, puede traer grandes beneficios que fortalecen la economía del país.

## 5. CONCLUSIONES

La importación de GNL es una solución técnicamente viable al problema de suministro de gas que Colombia puede enfrentar, para el año 2018, de acuerdo a lo proyectado. Al mismo tiempo, la implementación de esta tecnología trae desarrollo y generación de valor para el país en términos de evolución de la canasta energética. Por lo tanto, la ejecución de este trabajo, se realizó en un momento oportuno, ya que sirve como una fuente de consulta disponible a nivel académico, en la cual se encuentra bibliográfica y normas que podrían ser de utilidad para esta nueva industria del GNL en Colombia.

De acuerdo a lo estudiado y para el caso Colombiano, donde la temperatura ambiente es alta

durante todo el año (bahía de Cartagena), el sistema de vaporización de GNL seleccionado como base de estudio, fue adecuado ya que el agua de mar como fuente de energía para vaporizar el GNL, posee condiciones de temperatura, que dan un punto clave en la selección del vaporizador, siendo este al mismo tiempo, adecuado para la capacidad requerida a regasificar para Colombia. No obstante, la cantidad de intercambio de energía que requiere este vaporizador es bastante alta, como se determinó anteriormente, lo que conlleva a que se necesiten grandes cantidades y flujos de agua de mar, haciendo hasta cierto punto, crítico el tema ambiental. Por lo anterior, es de gran importancia considerar estudios del manejo adecuado del agua de mar, sobre todo en el instante a ser descargada nuevamente al mar.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, Republica de Colombia. *Análisis de oferta y demanda de gas natural en Colombia*. Bogotá, D.C.: UPME, 2013.
- [2] Mokhtab S, Mak J, Valappil J, Wood D. *LNG Fundamentals*. En: G. P. Publishing, 1er ed. *Handbook of liquefied natural gas*. Oxford: Elsevier, Inc.; 2014: 1-103.
- [3] Patel D, Mak J, Rivera D, Angtuaco J, "LNG Vaporizer selection base on site ambient conditions," presented at the LNG 17 Conference., Houston., United States, Abr. 2013.
- [4] Tusiani M, Shearer G. *LNG Import Terminals*. En: Paterson M. 1er ed. *LNG: A nontechnical guide*. Tulsa: Pennwell Corporation.; 2007, 165-195.
- [5] Debrota ?, Lali? B, Kormar I. *Problem of Boil-Off in LNG supply chain*. *Trans. Marit. Sci.* 2013; 02: 91 - 100.
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, Republica de Colombia. *Plan de abastecimiento de gas natural*. Bogotá, D.C.: UPME, 2013
- [7] British standard Institute. *Installation and equipment for liquefied natural gas - General characteristics of liquefied natural gas*. BSI EN 1160. First edition. 1997.
- [8] British standard Institute. *Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of Onshore Installations*. BSI EN 1473. First edition. 2007.
- [9] Estrany F, Dosta J, Perez J, Muñoz S, Rodríguez O. *Vaporizadores de agua de mar para gas natural licuado*. *Tecnica Industrial (TI)*. 2007; 01: 24 - 31.
- [10] Escudero R. *Diseño y estudio técnico - económico de una terminal de almacenamiento de regasificación de GNL*. Trabajo de grado (Ingeniero civil Mecánico), Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile, 2008.
- [11] Kumar R. *ASPEN simulation: Liquefied natural gas import terminal safety and security study*. Tesis de Maestría, Departament of Chemical Engineer, Faculty of the College of Graduate Studies, Lamar University, Beaumont, Texas, United States, 2006.
- [12] Tarakad R, *LNG receiving and regasification terminals*. 1er ed, Houston: Z. D. Corporation; 2003.