

Optimización Dimensional De Tuberías De Gas Licuado de Petróleo En Sistemas Industriales

Diego Venegas-Vásconez¹, César Ayabaca-Sarria², Salvatore Reina-Guzmán³, Óscar Farías-Fuentes⁴

¹Laboratorio de Cromatografía Gaseosa y Pirólisis Aplicada, Departamento de Ingeniería de Maderas, Universidad del Bío-Bío, Chile. Email: diego.venegas180@alumnos.ubiobio.cl

²DIMEB Research Group, Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Email: cesar.ayabaca@epn.edu.ec

³DIMEB Research Group, Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Email: salvatore.reina@epn.edu.ec

⁴Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: ofarias@udec.cl

Resumen

El gas licuado de petróleo (GLP) es uno de los combustibles más utilizados en la industria, entre otras razones porque su combustión es muy eficiente, es limpio en término de emisiones contaminantes y su poder calorífico es superior a otros combustibles. Se realiza la factibilidad técnica de instalar 3 calderos industriales que para su funcionamiento utilizan GLP cuya potencia total es 5400 kW. En base a 3 criterios de dimensionamiento de tubería, 3 locaciones de ciudades, la ubicación del regulador de segunda etapa y la presión de salida del regulador de primera etapa, el presente artículo busca optimizar la tubería de distribución del sistema en términos de costo de tuberías, selección del regulador de presión de primera y segunda etapa y ubicación de la planta industrial.

Palabras clave: Gas licuado de petróleo, dimensionamiento de tuberías, optimización dimensional, instalaciones industriales.

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) is one of the most used fuels in the industry, among other reasons because its combustion is very efficient, it is clean in terms of polluting emissions and its calorific value is higher than other fuels. The technical feasibility of installing 3 industrial boilers that use LPG for their operation whose total power is 5400 kW is carried out. Based on 3 piping sizing criteria, 3 city locations, the location of the second-stage regulator, and the outlet pressure of the first-stage regulator, this article seeks to optimize the system's distribution piping in terms of piping cost, selection of the first and second stage pressure regulator and location of the industrial plant.

Keywords: Liquefied petroleum gas, pipe sizing, dimensional optimization, industrial installations.

1. Introducción

El uso del GLP como combustible es muy frecuente para varias aplicaciones en sistemas residenciales, comerciales e industriales porque es considerado uno de los suministros de energía más seguros y eficientes [1,2]. Con una sola fuente de almacenamiento se pueden satisfacer más de 1.000 necesidades, entre ellas: cocción de alimentos, calentamiento de agua, secado de productos agrícolas, crianza de aves, entre otros [3,4]. Estas ventajas sobre otros combustibles han hecho que gobiernos nacionales de varios países impulsen su consumo masivo [5–9]. En la industria se encuentran con mucha frecuencia aplicaciones para este combustible en hornos, calderos, secadores y una gran variedad de equipos que requieren del GLP en grandes cantidades.

En trabajos previos se han presentado estudios para la optimización dimensional de tuberías de transporte de

GLP en aplicaciones comerciales [10] e industriales [11], donde se aplican diversos procedimientos y criterios de dimensionamiento de tuberías para conducción de gas reportados en la literatura especializada, se escoge de entre ellos, el criterio que garantice el menor diámetro de tubería para conducción de un flujo de combustible que garantice el funcionamiento óptimo de los equipos de consumo. En otro trabajo se evalúan algunos factores que inciden en la selección de la tubería más adecuada para sistemas de GLP, comparando la resistencia a la tracción, dureza y peso como propiedades de los materiales aceptados por las normativas vigentes para instalaciones GLP, se midieron tiempos de ejecución de uniones entre tuberías y accesorios y, finalmente, se compararon costos asociados a los materiales, mano de obra y mantenimiento [12]. También hemos presentado un estudio en el que se optimiza el diámetro de tubería de

GLP en un sistema que abastece del combustible a dos edificios de departamentos residenciales, variando la ubicación del regulador de presión de segunda etapa [13]. Finalmente, Coelho et. al. [14] realizaron una revisión donde presentan varios procedimientos de dimensionamiento de tuberías de transporte de gas para condiciones de régimen (laminar y turbulento), de presión de conducción (media y baja presión) entre otros criterios más.

A este grupo de trabajo se le ha encomendado la tarea de optimizar los diámetros de tubería de GLP de 3 sistemas similares ubicados en tres ciudades de Perú (Lima, Arequipa y Cuzco). Cada sistema va a abastecer el combustible a una industria cuya potencia total instalada individual es de 5400 kW. Los parámetros utilizados para la selección de la tubería de GLP óptima fueron los siguientes:

- Se determinaron 3 criterios de dimensionamiento de tubería para media presión (Mueller, NFPA 54 y Renouard) y 3 criterios de dimensionamiento para baja presión (Pole, NFPA 54 y Renouard).

- Se evaluó la ubicación del regulador de segunda etapa en los puntos 1 y 2 de la Figura 1, es decir a la salida del recipiente de almacenamiento del combustible y en la entrada del caldero.
- La altura sobre el nivel del mar de las ciudades donde se va a implementar el sistema (Lima, Arequipa y Cuzco) son (154, 2335 y 3399 msnm) respectivamente [15].
- Se seleccionaron 3 reguladores de presión de primera etapa con distintas presiones de salida: (0,5 bar, 1 bar y 1,5 bar).

2. Metodología

2.1. Esquema general de la instalación

En la Figura 1 se muestra un esquema general de la instalación, donde 1-2 es la distancia real de tubería de GLP a instalar (50 m).

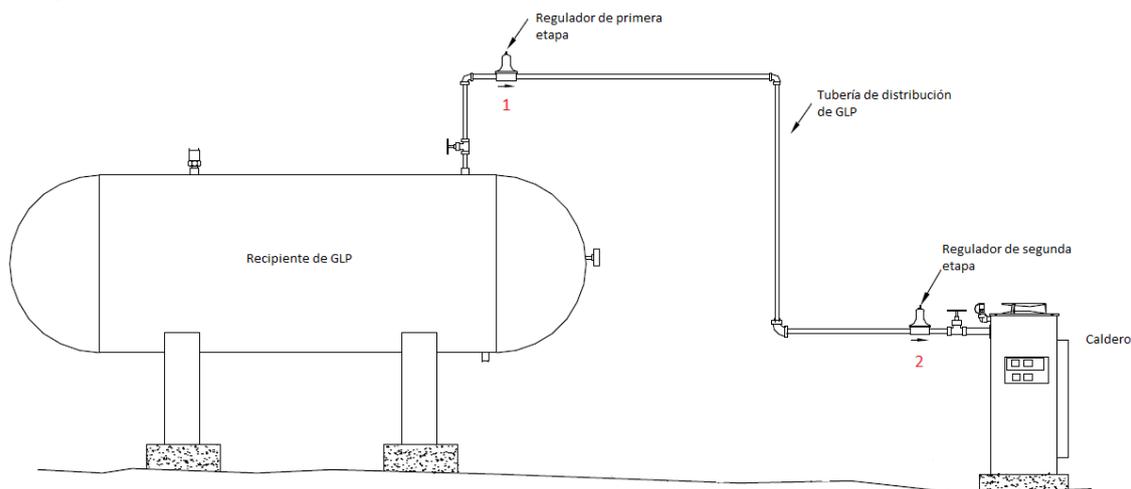


Figura 1. Esquema general del sistema de GLP. Fuente: Adaptado de [16].

2.2. Determinación de diámetros de tubería

De acuerdo a la presión que transporta una tubería de distribución de gas, se la puede clasificar de media o de baja presión. Vale aclarar que, a pesar de las diferencias en unidades expresadas en este trabajo, al momento del cálculo se han respetado las equivalencias.

2.2.1. Criterios de dimensionamiento de tuberías de media presión

Los siguientes son los criterios de dimensionamiento de tuberías de GLP de media presión escogidos.

- Mueller [17].

$$Q = \frac{461 \times 10^{-7} \times D^{2,725} \left(\frac{(1000 \times P_1)^2 - (1000 \times P_2)^2}{L} \right)^{0,575}}{G^{0,425}} \quad (1)$$

Donde:

Q caudal [m³/h], D diámetro interior de tubería [mm], P₁ presión absoluta de entrada [mbar], P₂ presión absoluta de salida [mbar], L longitud equivalente de tubería [m] y G gravedad específica del gas = 1,5.

- NFPA 54 [18].

$$D = \frac{Q^{0,381}}{18,93 \times \left(\frac{(14,7 \times P_1)^2 - (14,7 \times P_2)^2}{L \times Cr} \times Y_1 \right)^{0,206}} \quad (2)$$

Donde:

Q consumo en los artefactos [ft³/h], D diámetro interior de tubería [in], P₁ presión inicial en el tramo [psi], P₂ presión final en el tramo [psi], L longitud

equivalente de tubería [ft], Cr factor en función del tipo de gas = 1,2462 y $Y_1 = 0,99$.

- Renouard [14].

$$D^{4,82} = 48,6 \times ds \times \left(\frac{L}{p_1^2 - p_2^2} \right) \times Q^{1,82} \quad (3)$$

Donde:

Q caudal [m^3/h], D diámetro interior [mm], P_1 presión absoluta al inicio del tramo [mbar], P_2 presión absoluta al final del tramo [mbar], L longitud equivalente de tubería [m] y ds densidad relativa del gas = 1,6.

2.2.2. Criterios de dimensionamiento de tuberías de baja presión

Los siguientes son los criterios de dimensionamiento de tuberías de GLP escogidos para baja presión:

- Pole [17]

$$Q = 304 \times 10^5 \times C \times \left(\frac{D^5 H}{G \times L} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Donde:

Q caudal [m^3/h], D diámetro interior de tubería [mm], C factor en función del diámetro de tubería, para el presente estudio (2,16), H pérdida de carga [mbar], L longitud equivalente de tubería [m] y G gravedad específica del gas = 1,6.

- NFPA 54 [18].

$$D = \frac{Q^{0,381}}{19,17 \times \left(\frac{\delta H}{Cr \times L} \right)^{0,206}} \quad (5)$$

Donde:

Q consumo de los artefactos [ft^3/h], D diámetro interior de la tubería [in], δH caída de presión en el tramo de tubería [in columna de agua], L longitud equivalente de tubería [ft] y Cr factor en función del tipo de gas = 1,2462.

- Renouard [14].

$$D^{4,82} = 232000 \times ds \times \frac{Le}{\delta P} \times Q^{1,82} \quad (6)$$

Donde:

Q caudal en [m^3/h], D diámetro interior [mm], δP diferencia de presión en el tramo [mbar], Le longitud equivalente [m] y ds densidad relativa del gas = 1,6.

2.3. Determinación de la presión atmosférica en función de la altura

Conforme se incrementa la altitud de una ciudad sobre el nivel del mar, la presión atmosférica disminuye conforme a la Ecuación 7 [19].

$$p = 1.013 \times (1 - 0.0000225577 \times H)^{5,2559} \quad (7)$$

Donde:

P presión en función de la altura [bar] y H altura de la ciudad sobre el nivel del mar [m].

2.4. Diámetro equivalente de tubería

Mientras un fluido recorre por una tubería se generan pérdidas asociadas a la fricción entre el fluido y las paredes de dicha tubería, las cuales pueden expresarse con la relación [20]:

$$L_{equ} = 1,2 \times L \quad (7)$$

Donde:

L_{equ} longitud equivalente de tubería [m] y L longitud real de tubería [m].

3. Resultados y análisis de resultados

3.1. Resultados

En la Tabla 1 se muestra el resultado del dimensionamiento de tuberías de GLP de media presión para las 3 ciudades: Lima (124 msnm), Arequipa (2335 msnm) y Cuzco (3399 msnm) para las presiones de salida del regulador de primera etapa (0,5 bar, 1 bar y 1,5 bar). En la Tabla 2 se muestra el resultado del dimensionamiento para tubería de baja presión, donde se coloca la potencia total en kW y la longitud del trayecto de tubería a instalar.

Tabla 1. Dimensionamiento de tuberías de GLP de media presión.

Altura de ciudad [msnm]	Presión en el regulador [bar]	D Mueller [in]	D NFPA 54 [in]	D Renouard [in]
154	0,5	2,18	2,06	2,31
154	1	1,79	1,68	1,89
154	1,5	1,57	1,47	1,66
2335	0,5	2,26	2,14	2,40
2335	1	1,83	1,73	1,94
2335	1,5	1,60	1,50	1,69
3399	0,5	2,30	2,18	2,44
3399	1	1,85	1,75	1,96
3399	1,5	1,62	1,52	1,71

Tabla 2. Dimensionamiento de tuberías de GLP de baja presión.

Potencia	Longitud	D Poly	D NFPA 54	D Renouard
[kW]	[m]	[plg]	[plg]	[plg]
5400	50	4,87	6,02	5,11

Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 1, se desarrolló la Figura 2, y se puede mencionar lo siguiente:

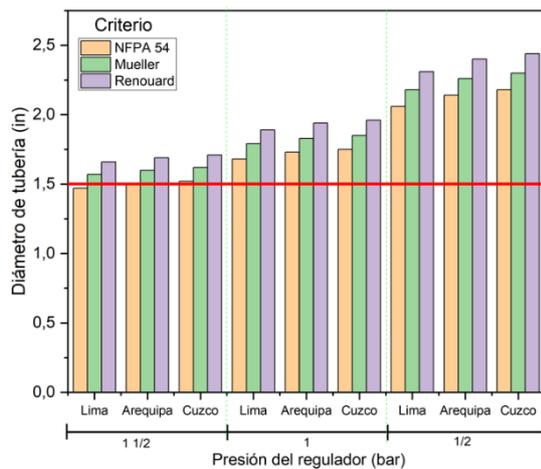


Figura 2. Diámetros de tubería (media presión) según los criterios de selección utilizados, ciudades donde se instala el sistema y presión de salida del regulador de primera etapa.

- Entre los criterios de dimensionamiento para media presión, el criterio de NFPA 54 es el que entrega menor diámetro de tubería, mientras que el criterio de Renouard es el más “conservador”, ya que entrega los resultados de diámetros más altos para cada una de las configuraciones de ciudad y presión de salida del regulador de primera etapa.
- Cuando se modifica la presión de salida del regulador de primera etapa, se puede observar que los menores diámetros de tubería se consiguen a la mayor presión (1,5 bar), y conforme se baja la presión de salida del regulador, el diámetro de tubería se incrementa. Esto porque al incrementar la presión, se incrementa la velocidad de flujo del GLP a través de la tubería, por tanto existe un mayor caudal, esto hace que el diámetro requerido para llevar el mismo flujo de combustible sea menor.
- Comparando los resultados de la altura sobre el nivel del mar de la ciudad donde estará la planta, se observa que a menor

altura (Lima 154 msnm) se tienen los menores diámetros y estos se van incrementando conforme se incrementa la ubicación sobre el nivel del mar de las ciudades.

Viendo los resultados de los diámetros obtenidos en la Tabla 2 de acuerdo a los distintos criterios de dimensionamiento para baja presión, se desarrolló la Figura 3, de lo que se puede mencionar lo siguiente:

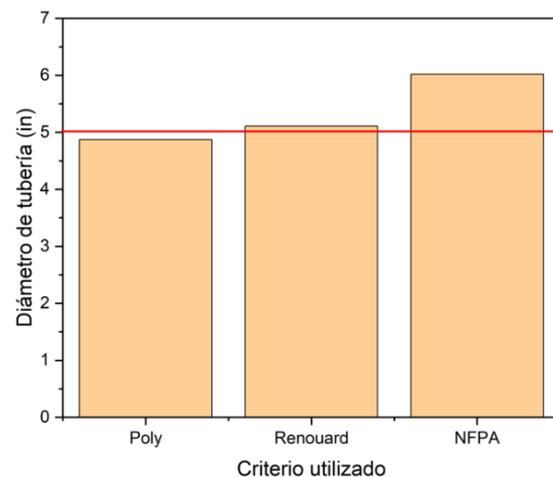


Figura 3. Diámetros de tubería (baja presión) según los criterios de selección utilizados.

- El criterio más favorable es el de Poly, mientras que el criterio más conservador (mayor diámetro) es el de NFPA 54.
- Sin embargo, comparando el menor resultado (4,69 in), es por lo menos dos veces superior al diámetro de cualquiera de los criterios para media presión, eso quiere decir que la configuración óptima de instalación es aquella donde el regulador de primera etapa está lo más cercano al tanque de almacenamiento, y el regulador de segunda etapa está lo más cercano al equipo de consumo. Esto sucede porque a una mayor presión de salida del regulador, se tiene mayor velocidad de flujo del GLP a través de la tubería, lo cual ocasiona que el diámetro requerido sea menor. Resultados similares lo consiguieron Venegas et.al. [13].

De los resultados obtenidos se pueden indicar las siguientes observaciones generales:

- En los criterios de dimensionamiento de baja presión se utiliza la diferencia de presión entre el punto inicial y final del tramo de tubería, por tanto la presión expresada en los criterios es la manométrica, y no la absoluta como en los criterios de media presión, por ende no importa la ciudad donde está ubicada la ciudad, el valor de diferencia de presión es siempre el mismo.
- La diferencia de presión utilizada en este caso ha sido de 150 [Pa], valor recomendado en el Decreto 66 de Chile [21].

4. Conclusiones

Reducir el diámetro de tubería en una red de gas optimiza recursos materiales, humanos y económicos.

Seleccionar un método de dimensionamiento de tubería adecuado puede dar viabilidad económica a un proyecto industrial como el presentado.

Resulta vital la selección adecuada del regulador de presión de primera etapa, ya que su ajuste hacia una presión de salida “grande” puede marcar la diferencia en el costo final del sistema.

La configuración adecuada de ubicación de reguladores de presión en un sistema de GLP es que el regulador de primera etapa se ubique lo más cercano al tanque de almacenamiento, y que el regulador de segunda etapa se ubique lo más cerca a los equipos de consumo.

Cuando se busca una locación adecuada, es preferible ubicar el sistema en ciudades a poca altura sobre el nivel del mar.

5. Agradecimientos

Al Ing. Francisco Soto de la empresa Lipigas Chile y a los Ing. Richard Azañero y Edwin Boza Lipigas Perú por toda su contribución y apertura para el desarrollo de la aplicación de dimensionamiento de redes de GLP “Lipical”.

A la Escuela Politécnica Nacional EPN-Ecuador, con sus líneas de investigación: “Producción Sostenible en Procesos de Manufactura” y “Mitigación de Vibraciones y Eficiencia Energética de Sistemas de Transporte Automotor y Aeronáutico”, por el apoyo brindado para la elaboración de este trabajo.

6. Referencias

[1] D. Venegas Vásconez, S. Celi Ortega, J. Rocha Hoyos, C. Ayabaca Sarria, E. Mena Mena, Manejo del gas licuado de petróleo en Panamá, RIDTEC. 13 (2017) 22–30. <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id->

tecnologico/article/view/1711.

[2] P. Boggavarapu, B. Ray, R. V Ravikrishna, Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies, *Fuel*. 116 (2014) 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.054>.

[3] GASNOVA, Gas Licuado de Petróleo – GLP Oportunidades para Colombia. Transporte e industria, 2014.

[4] R. Kities, P. Mulder, P. Rietveld, Energy poverty reduction by fuel switching. Impact evaluation of the LPG conversion program in Indonesia, *Energy Policy*. 66 (2014) 436–449. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.021>

[5] K. Troncoso, A. Soares, LPG fuel subsidies in Latin America and the use of solid fuels to cook, *Energy Policy*. 107 (2017) 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.046>

[6] D. Kimemia, H. Annegarn, Domestic LPG interventions in South Africa: Challenges and lessons, *Energy Policy*. 93 (2016) 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.005>

[7] P. Kumar, R. Kaushalendra Rao, N.H. Reddy, Sustained uptake of LPG as cleaner cooking fuel in rural India: Role of affordability, accessibility, and awareness, *World Dev. Perspect.* 4 (2016) 33–37. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2016.12.001>.

[8] S.L. Pollard, K.N. Williams, C.J. O’Brien, A. Winiker, E. Puzzolo, J.L. Kephart, M. Fandiño-Del-Río, C. Tarazona-Meza, M.R. Grigsby, M. Chiang, W. Checkley, An evaluation of the Fondo de Inclusión Social Energético program to promote access to liquefied petroleum gas in Peru, *Energy Sustain. Dev.* 46 (2018) 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.001>.

[9] C.F. Gould, S.B. Schlesinger, E. Molina, M.L. Bejarano, A. Valarezo, D.W. Jack, Household fuel mixes in peri-urban and rural Ecuador: Explaining the context of LPG, patterns of continued firewood use, and the challenges of induction cooking, *Energy Policy*. 136 (2020) 111053. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111053>

[10] D. Venegas, C. Ayabaca, S. Celi, J. Rocha, Optimización dimensional de un sistema comercial de GLP, in: XXII Congr. Nac. Ing. Mecánica, 2018: pp. 1205–1211.

[11] D. Venegas, C. Ayabaca, S. Celi, J. Rocha, E. Mena, Optimización en el dimensionamiento de un sistema industrial de gas licuado de petróleo, *I+D Tecnológico*. 14 (2018) 41–48. <https://doi.org/10.33412/idt.v14.1.1801>.

- [12] D.F. Venegas Vásconez, C. Ayabaca Sarria, S. Celi Ortega, J. Rocha Hoyos, E. Mena Mena, Factores para seleccionar tuberías de conducción de gas licuado de petróleo en el Ecuador, *Ingenius*. (2018) 51–59. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.05>.
- [13] D. Venegas, C. Ayabaca, S. Reina, M. Arrocha, O. Fariás, Location of second stage pressure regulator in the feasibility of residential liquefied petroleum gas projects, *Mater. Today Proc.* 49 (2022) 210–215. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.258>
- [14] P.M. Coelho, C. Pinho, Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 29 (2007) 262–273. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000300005>.
- [15] DePerú, Distancia y altitudes de ciudades, (2022). https://www.deperu.com/datos_utiles/distancias_altitudes.php.
- [16] Algas SDI, Fuego Directo: Vaporizador de Gas LP: 40/40H, 80,40H y 120/60H, 2022.
- [17] R. Pérez Carmona, Diseño de instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones, 3ra ed., Bogotá, 2001.
- [18] National Fire Protection Association (NFPA), National Fuel Gas Code: NFPA 54 ANSI Z223.1–2012, 2012.
- [19] Herramientas ingeniería, Calculadora altitud-presión, (2022). <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud.html>.
- [20] A. Hernández, A. García, Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Materias comunes Tipos A, B y C. Cálculo de instalaciones receptoras, 2008.
- [21] Ministerio de Economía Gobierno de Chile, Reglamento de instalaciones interiores y medidores de gas, (2007).